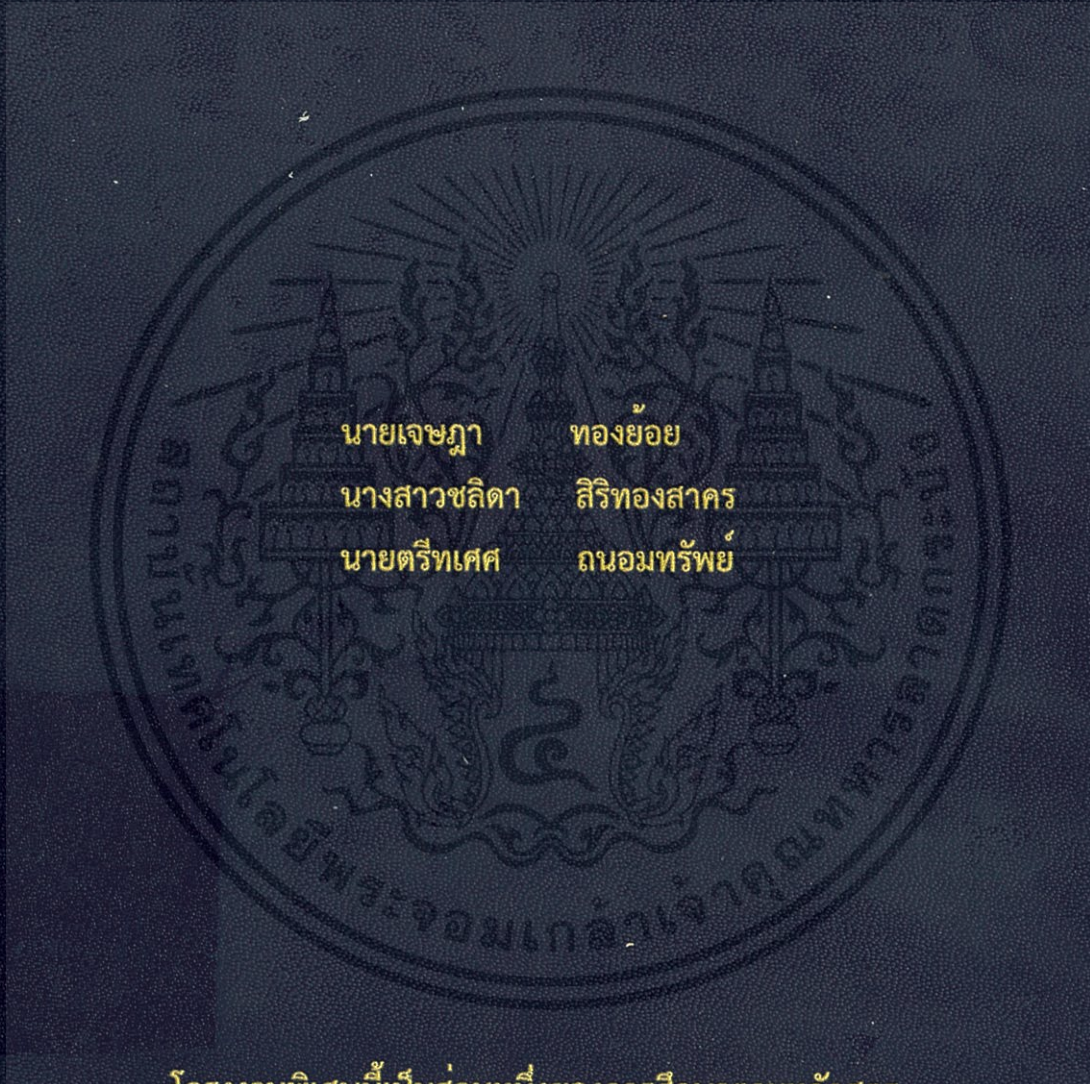


การศึกษาวิเคราะห์ไมโครฟลูอิดิกด้วยระบบดิจิทัลโฮโลกราฟี  
THE DIGITAL HOLOGRAPHY SYSTEM FOR INVESTIGATION  
MICROFLUIDIC



นายเจษฎา ทองย้อย  
นางสาวชลิตา สิริทองสาคร  
นายตรีทเศศ ถนอมทรัพย์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

การศึกษาวิเคราะห์ไมโครฟลูอิดิกด้วยระบบดิจิทัลโฮโลกราฟี  
THE DIGITAL HOLOGRAPHY SYSTEM FOR INVESTIGATION  
MICROFLUIDIC



นายเจษฎา  
นางสาวชลิดา  
นายตรีทศ

ทองย้อย  
สิริทองสาคร  
ถนอมทรัพย์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรนำออกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ นำของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

THE DIGITAL HOLOGRAPHY SYSTEM FOR INVESTIGATION  
MICROFLUIDIC



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN APPLIED PHYSICS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนำไปใช้เฉพาะการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEPARTMENT OF PHYSICS  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2014

**หัวข้อโครงการพิเศษ**

การศึกษาวิเคราะห์ไมโครฟลูอิดิกด้วยระบบดิจิทัลโฮโลกราฟี  
 The Digital Holography System for Investigation  
 Microfluidic

**ชื่อนักศึกษา**

นายเจษฎา ทองย่อย รหัสนักศึกษา 54050499  
 นางสาวชลิดา สิริทองสาคร รหัสนักศึกษา 54050506  
 นายตรีทศ ศนอมทรัพย์ รหัสนักศึกษา 54050524

**ปริญญา**

วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์

**ภาควิชา**

ฟิสิกส์





**ปีการศึกษา**

2557

**อาจารย์ที่ปรึกษา**

ดร.ประธาน บุรณศิริ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์  
 ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
อ.สุรชาติ กมลดีลัก	
อ.กฤษฎ์ ศรีนวลจันทร์	
ดร.เชรชฐา รัตนพันธ์	
ดร.ประธาน บุรณศิริ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาวิเคราะห์ที่ไม่โครฟลูอิดิคด้วยระบบดิจิทัลโฮโลกราฟี		
ชื่อนักศึกษา	นายเจษฎา ทองย้อย	รหัสนักศึกษา	54050499
	นางสาวชลิตา สิริทองสาคร	รหัสนักศึกษา	54050506
	นายตรีทเศศ ถนอมทรัพย์	รหัสนักศึกษา	54050524
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์		
ภาควิชา	ฟิสิกส์		
ปีการศึกษา	2557		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ประธาน บุรณศิริ		

### บทคัดย่อ

การมองเห็นอนุภาคภายในของเหลวเป็นเรื่องที่ยาก ยิ่งเป็นอนุภาคที่เคลื่อนที่ในของเหลวที่หยุดนิ่งยิ่งเพิ่มความยากขึ้นอีก งานวิจัยนี้ได้พิสูจน์ศึกษาความเกี่ยวข้องการเคลื่อนที่ของวัตถุกับของเหลวด้วยดิจิทัลโฮโลกราฟี ตัวอย่างพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ ขนาดของอนุภาค ชนิดของของเหลว ความเร็วของอนุภาคและขนาดของช่องของไหล งานวิจัยนี้ได้ใช้การติดตั้งระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีแบบวิธีการ Mach-Zehnder หลังจากบันทึกภาพแล้วเราจะทำการสร้างภาพใหม่เพื่อให้ได้ภาพที่ชัดเจน บันทึกภาพโดยถ่ายภาพต่อเนื่องเพราะต้องการเห็นการเคลื่อนที่ของอนุภาค การศึกษาคุณสมบัติการเคลื่อนที่ของอนุภาคในของเหลวง่ายขึ้นโดยการใช้ระบบดิจิทัลโฮโลกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	THE DIGITAL HOLOGRAPHY SYSTEM FOR INVESTIGATION MICROFLUIDIC		
<b>Students</b>	Mr.Jedsada Thongyoi	Student ID 54050499	
	Miss Chalida Sirithongsakorn	Student ID 54050506	
	Mr.Treeeases Thanomsub	Student ID 54050524	
<b>Degree</b>	Bachelor of Science in Applied Physics		
<b>Department</b>	Physics		
<b>Academic Year</b>	2014		
<b>Advisor</b>	Dr.Prathan Buranasiri		

### Abstract

Seeing the small particles within liquid is difficult. Moreover, the particle is moving through stationary liquid or it is moving with liquid are hard to observe too. For this reason, this research is improving the investigation of small particle and liquid in variant pattern of movement by Digital Holography. Example importance of parameters include variant particle size, types of liquid, particle speed, liquid flow rate and size of small channel tubes. Including, setting up Digital Holography by using Mach Zehnder method. After recorded images, we will reconstruction to make them clearer then we can focus multi position for an image, because we can see the particle movement, particle size involve particle speed. Hence, we can analyze characteristics of particle movement in liquid easily by using Digital Holography.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้า นายเจษฎา ทองย้อย นางสาวชลิตา สิริทองสาคร และนายตรีทเศศ ถนอมทรัพย์ นักศึกษาจาก สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ ได้จัดทำโครงการพิเศษในหัวข้อเรื่อง การศึกษาวิเคราะห์ไมโครฟลูอิดิกส์ด้วยระบบดิจิทัลโฮโลกราฟี เล่มนี้สามารถสำเร็จจุล่งได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความสนับสนุน และความช่วยเหลือของอาจารย์ ดร.ประธาน บุรณศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ผู้ซึ่งให้ความรู้ ให้แนวคิด และให้คำปรึกษา ในขณะที่ทำการวิจัยนี้มาโดยตลอด งานวิจัยนี้สามารถบรรลุเป้าหมาย

ขอขอบคุณ เพื่อนๆสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ทุกคนที่ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการทำโครงการพิเศษมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตา ตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับ และกลุ่มวิชาเลือก จนถึงปัจจุบัน ตลอดจนกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยดูแล ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังสำคัญในการผลักดันให้ข้าพเจ้าทั้งสามมีกำลังใจในการทำโครงการพิเศษมาโดยตลอด

นายเจษฎา	ทองย้อย
นางสาวชลิตา	สิริทองสาคร
นายตรีทเศศ	ถนอมทรัพย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ศ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
2.1 แสง	3
2.2 เลเซอร์	4
2.3 โคฮีเรนซ์ (coherence)	6
2.4 การแทรกสอด (interference)	7
2.5 โฮโลแกรมกราฟิ (Holography)	8
2.6 วิธีการทำงานของโฮโลกราฟี	9
2.6.1 ดิจิตอลโฮโลกราฟี (Digital Holography)	11
2.6.2 หลักการทำงานของดิจิตอลโฮโลกราฟี	11
2.6.3 หลักการ Reconstruction โดยวิธี Angular spectrum	12
2.7 ของไหล	12
2.8 แรงแลยตัวและหลักการของอาคิมิดีส	18
2.9 จลศาสตร์	21
<b>บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>28</b>
3.1 อุปกรณ์การทดลอง	28
3.2 วิธีการทดลอง	32
<b>บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>33</b>
4.1 ระบบดิจิตอลโฮโลกราฟีที่ได้เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุขนาดเล็ก	33
4.2 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำกลั่นในท่อขนาด 2×2 mm.	34
4.2.1 ผลการถ่ายภาพที่อุณหภูมิต่ำ	34
4.2.2 ผลการถ่ายภาพที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิต่ำ	35
4.2.3 ผลการถ่ายภาพที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิต่ำ	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องเรียนเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำกลั่นในท่อขนาด 2.5×2.0 mm.	38
4.3.1 ผลการถ่ายภาพที่อุณหภูมิห้อง	38
4.3.2 ผลการถ่ายภาพที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง	39
4.3.3 ผลการถ่ายภาพที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง	40
4.4 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 1.239 mol/L ในท่อขนาด 2×2 mm.	40
4.4.1 ผลการถ่ายภาพที่อุณหภูมิห้อง	40
4.4.2 ผลการถ่ายภาพที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง	42
4.5 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 2.397 mol/L ในท่อขนาด 2×2 mm.	44
4.5.1 ผลการถ่ายภาพที่อุณหภูมิห้อง	44
4.5.2 ผลการถ่ายภาพที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง	46
4.6 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 4.502 mol/L ในท่อขนาด 2×2 mm.	48
4.6.1 ผลการถ่ายภาพที่อุณหภูมิห้อง	48
4.6.2 ผลการถ่ายภาพที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง	53
4.7 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 1.239 mol/L ในท่อขนาด 2.5×2.0 mm.	59
4.7.1 ผลการถ่ายภาพที่อุณหภูมิห้อง	59
4.7.2 ผลการถ่ายภาพที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง	61
4.8 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 2.397 mol/L ในท่อขนาด 2.5×2.0 mm.	62
4.8.1 ผลการถ่ายภาพที่อุณหภูมิห้อง	62
4.8.2 ผลการถ่ายภาพที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง	63
4.9 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 4.502 mol/L ในท่อขนาด 2.5×2.0 mm.	65
4.9.1 ผลการถ่ายภาพที่อุณหภูมิห้อง	65
4.9.2 ผลการถ่ายภาพที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง	69
4.10 เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำกลั่นในช่องขนาด 2x2 mm.	75
4.11 เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำกลั่นในช่องขนาด 2.5x2.0 mm.	76
4.12 เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 1.239 mol/L ในช่องขนาด 2x2 mm.	77
4.13 เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 2.397 mol/L ในช่องขนาด 2x2 mm.	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ขนาด 2x2 mm. หัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการ 78 ไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.14 เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 4.502 mol/L ในช่อง ขนาด 2x2 mm.	79
4.15 เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 1.239 mol/L ในช่อง ขนาด 2.5x2.0 mm.	80
4.16 เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 2.397 mol/L ในช่อง ขนาด 2.5x2.0 mm.	82
4.17 เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 4.502 mol/L ในช่อง ขนาด 2.5x2.0 mm.	82
<b>บทที่ 5</b> สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	84
เอกสารอ้างอิง	86



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงาน	2
2.1 ค่าความหนืดของน้ำกับอุณหภูมิ	18
4.1 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำกลั่นในท่อขนาด 2×2 mm. ที่อุณหภูมิห้อง	34
4.2 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำกลั่นในท่อขนาด 2×2 mm. ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง	35
4.3 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำกลั่นในท่อขนาด 2×2 mm. ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง	37
4.4 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำกลั่นในท่อขนาด 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิห้อง	38
4.5 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำกลั่นในท่อขนาด 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง	39
4.6 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำกลั่นในท่อขนาด 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง	40
4.7 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 1.239 mol/L ในท่อขนาด 2×2 mm. ที่อุณหภูมิห้อง	41
4.8 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 1.239 mol/L ในท่อขนาด 2×2 mm. ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง	42
4.9 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 2.397 mol/L ในท่อขนาด 2×2 mm. ที่อุณหภูมิห้อง	45
4.10 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 2.397 mol/L ในท่อขนาด 2.×2 mm. ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง	46
4.11 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 4.502 mol/L ในท่อขนาด 2×2 mm. ที่อุณหภูมิห้อง	49
4.12 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 4.502 mol/L ในท่อขนาด 2×2 mm. ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง	54
4.13 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 1.239 mol/L ในท่อขนาด 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิห้อง	60
4.14 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 1.239 mol/L ในท่อขนาด 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง	61
4.15 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 2.397 mol/L ในท่อขนาด 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิห้อง	62
4.16 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 2.397 mol/L ในท่อขนาด 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง	63
4.17 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 4.502 mol/L ในท่อขนาด 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิห้อง	65
4.18 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 4.502 mol/L ในท่อขนาด 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง	69
4.19 ความเร็วที่ได้จากการทดลองทั้งหมด	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบให้สำหรับใช้ในการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่า 4.19 ความเร็วที่ได้จากการทดลองทั้งหมด เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการ 83) ไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการเกิดเลเซอร์	5
2.2 แสดงโคฮีเรนซ์ของคลื่น (a)โคฮีเรนซ์ (coherence) และ (b)ไม่โคฮีเรนซ์(incoherence)	6
2.3 แสดงการแทรกสอดของแสงบนฉากร	7
2.4 แสดงการบันทึกภาพ (recording of image)	10
2.5 แสดงการสร้างภาพ (reconstruction of image)	10
2.6 ตัวอย่างการบันทึกภาพของดิจิตอลโฮโลกราฟี	12
2.7 แสดง velocity profile ของการไหล	13
2.8 แสดงการไหลของของไหลภายในท่อ	14
2.9 แสดงลักษณะของผิวน้ำภายในท่ออธิบายด้วยเลขเรย์โนลด์	15
2.10 แสดงการไหลของวัตถุด้วยของไหลภายในท่อ	16
2.11 แสดงของไหลเคลื่อนที่ผ่านวัตถุทรงกลม	17
2.12 แรงภายนอกที่กระทำต่อรูปทรงลูกบาศก์ที่จมอยู่ในของไหลได้แก่แรงโน้มถ่วง $F_g$ และแรงลอยตัว $B$	19
2.13 (a) วัตถุจมอยู่ในของไหลทั้งหมดโดยวัตถุมีความหนาแน่นน้อยกว่าของไหล ทำให้การจมนั้นมีแรงลัพท์ในทิศขึ้น (b) วัตถุจมอยู่ในของไหลทั้งหมดโดยวัตถุมีความหนาแน่นมากกว่าของไหล ทำให้การจมนั้นมีแรงลัพท์ในทิศลง และทำให้วัตถุจม	21
2.14 วัตถุลอยอยู่บนผิวของไหลมีแรงมากระทำสองแรงแรงโน้มถ่วง $F_g$ และแรงลอยตัว $B$	21
2.15 เมื่อเวลา $t_1$ และ $t_2$ อนุภาคอยู่ที่ตำแหน่ง A และ B ตามลำดับ โดยมี $r(t_1)$ และ $r(t_2)$ เป็นเวกเตอร์บอกตำแหน่งตามลำดับ แนวเส้นสัมผัสกับเส้นทาง (path) ของอนุภาคที่จุดใด แสดงทิศของความเร็วบัดดล $V = \frac{dr}{dt}$ ณ จุดนั้น	22
2.16 (ก) เมื่อเวลา $t_1$ อนุภาคอยู่ที่ A มีความเร็ว $v(t_1)$ และมีความเร็ว $v(t_2)$ ที่ B เมื่อเวลา $t_2$ (ข) การเปลี่ยนความเร็วในช่วงเวลา $\Delta t = t_2 - t_1$ ความเร็วของอนุภาคเปลี่ยนไปเป็น $\Delta v = v(t_2) - v(t_1)$	24
2.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลาของอนุภาคที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ โดยความชันเส้นกราฟคือค่าของความเร็วคงที่	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 ความเกี่ยวข้องของความเร็วและความเร่ง อธิบายโดยภาพการเคลื่อนที่ เป็นเส้นตรงของรถยนต์บนถนน ความเร็วในแต่ละช่วงเวลาแสดงโดยลูกศร ด้านบนตัวรถ และความเร่งซึ่งมีค่าคงที่แสดงโดยลูกศรที่อยู่ด้านล่างตัวรถ	27
3.1 แสดงการติดตั้งระบบดัดจัตตอลไฮโลกราฟีแบบ Mach Zehnder	32
4.1 ระบบดัดจัตตอลไฮโลกราฟีที่ได้จากการติดตั้งแบบ Mach Zehnder	33
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาที่เม็ดพลาสติก เคลื่อนที่ผ่านน้ำกลั่นในช่องขนาด 2x2 mm.	75
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาที่เม็ดพลาสติก เคลื่อนที่ผ่านน้ำกลั่นในช่องขนาด 2.5x2.0 mm.	76
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาที่เม็ดพลาสติก เคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 1.239 mol/L ในช่องขนาด 2x2 mm.	77
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาที่เม็ดพลาสติก เคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 2.397 mol/L ในช่องขนาด 2x2 mm.	78
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาที่เม็ดพลาสติก เคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 4.502 mol/L ในช่องขนาด 2x2 mm.	79
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาที่เม็ดพลาสติก เคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 1.239 mol/L ในช่องขนาด 2.5x2.0 mm.	80
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาที่เม็ดพลาสติก เคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 2.397 mol/L ในช่องขนาด 2.5x2.0 mm.	81
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาที่เม็ดพลาสติก เคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 4.502 mol/L ในช่องขนาด 2.5x2.0 mm.	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการพิเศษ

เราสามารถใช้นวัตกรรมและเทคโนโลยีต่างๆ มาใช้เพื่อศึกษาโครงสร้างแบบภายนอกหรือภายในของสิ่งที่มีขนาดเล็กๆ โดยมีการเริ่มให้ความสนใจในสิ่งที่มีขนาดเล็กตั้งแต่ที่กาลิเลโอ กาลิเลอี (Galileo Galilei) มีการประยุกต์ใช้เลนส์ จนถึงองตวน ฟิลิปส์ ฟัน เลเวนฮุก (Antonie Philips van Leeuwenhoek) มีการพัฒนาเรื่อยมาจนเป็นกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ทั้งแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope) เรียกว่า TEM ซึ่งคิดค้นโดย เอิร์นส์ รุสกา ในปี พ.ศ. 2475 ใช้ศึกษาโครงสร้างภายในของเซลล์ โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องผ่านเซลล์หรือตัวอย่างที่ต้องการศึกษาซึ่งผู้ศึกษาต้องเตรียมตัวอย่างให้ได้ขนาดบางเป็นพิเศษหรือแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) เรียกว่า SEM ซึ่งคิดค้นโดย เอ็ม วอน เอนเดนนี สร้างเสร็จในปี พ.ศ. 2481 ใช้ศึกษาโครงสร้างของผิวเซลล์หรือผิววัตถุ โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุ ทำให้ได้ภาพที่มีลักษณะเป็น 3 มิติแต่ทุกอย่างที่กล่าวมานั้นล้วนมีข้อจำกัด ไม่ว่าจะเป็นด้านราคาหรือคุณสมบัติของตัวเทคโนโลยีที่ใช้

ในการศึกษานี้จะศึกษาความเป็นไปได้ในการสังเกตการเคลื่อนที่ของวัตถุขนาดภายในของเหลวโดยใช้เทคโนโลยีดิจิทัลโฮโลกราฟีถ่ายภาพสิ่งของขนาดเล็กๆ หลากหลายขนาด สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วภายในได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อแก้ววัตถุ และการเคลื่อนที่ของของเหลว แสงผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่างกันทำให้เกิดภาพที่มีมิติแตกต่างกัน โดยภาพที่ได้จะเป็นภาพนิ่งของวัตถุขณะที่เคลื่อนอยู่ ระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีช่วยในกำหนดจุดโฟกัสได้หลายระยะเพื่อหาภาพที่ชัดเจนที่สุดทำให้เห็นถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของของเหลวและวัตถุขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังสามารถบอกอัตราการเคลื่อนที่ของวัตถุได้อีกด้วย ระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีนี้ใช้แค่อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ 1 ระบบ กล้องดิจิทัล 1 ตัว เลเซอร์ 1 ตัว และระบบไมโครพิวติดิก

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) สร้างระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีเพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ในช่องขนาดเล็กได้
- 2) ใช้ระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีถ่ายภาพวัตถุในของเหลวภายในช่องขนาดเล็กได้
- 3) ใช้ภาพที่ได้วิเคราะห์ลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุขนาดเล็กภายในของเหลวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ศึกษาการทำงานเบื้องต้นของระบบดิจิทัลโฮโลกราฟี
- 2) ออกแบบและสร้างระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีเพื่อศึกษาการไหลภายในช่องขนาดเล็ก
- 3) ถ่ายภาพวัตถุขนาดเล็กในของเหลวภายในช่องขนาดเล็กด้วยระบบดิจิทัลโฮโลกราฟี

### 1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แสดงขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ช่วงระยะเวลา
ศึกษาระบบและขั้นตอนการทำงานของระบบดิจิทัลโฮโลกราฟี	สิงหาคม-ธันวาคม พ.ศ.2557
ออกแบบระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีและระบบการเคลื่อนที่ภายในช่องขนาดเล็ก	ธันวาคม พ.ศ.2557-มกราคม พ.ศ. 2558
จัดซื้ออุปกรณ์การสร้างระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีและระบบการเคลื่อนที่ภายในท่อแก้วศึกษาโปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง	มกราคม พ.ศ.2558
ติดตั้งระบบดิจิทัลโฮโลกราฟี ทดลองและวิเคราะห์ผลจากบันทึกผลการทดลอง	มกราคม-พฤษภาคม พ.ศ.2558

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เข้าใจหลักการทำงานของระบบดิจิทัลโฮโลกราฟี
- 2) ได้ระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีเพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุขนาดเล็กผ่านของเหลว
- 3) สามารถหาความเร็วของวัตถุภายในท่อขนาดเล็กที่ได้จากการใช้ระบบดิจิทัลโฮโลกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แสง

ในศตวรรษที่ 17 มีทฤษฎีเกี่ยวกับแสงอยู่ 2 ทฤษฎี ได้แก่ ทฤษฎีคลื่นแสง (wave theory) ซึ่งเสนอโดย Hooke และ Huygens และ ทฤษฎีอนุภาคแสง (corpuscular theory) เสนอโดย Newton ผลการทดลองของ Young, Malus และ Euler แสดงให้เห็นปรากฏการณ์เลี้ยวเบน (diffraction) การแทรกสอด (interference) และโพลาไรเซชัน (polarization) ของแสง ซึ่งเป็นสมบัติของคลื่น จึงเป็นการสนับสนุนความเชื่อในทฤษฎีที่กล่าวว่าแสงเป็นคลื่น จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1864 Maxwell ได้รวบรวมสมการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (equation of electromagnetism)

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad \dots(1)$$

โดย  $E$  คือ ค่าของสนามไฟฟ้า

$c$  คือ ความเร็วของแสงในสุญญากาศ  $= 3 \times 10^8$  m/s

ตัวดำเนินการลาปลาซ (Laplace Operator) มีสมการดังนี้

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad \dots(2)$$

การสั่นของสนามไฟฟ้าสามารถสั่นได้ในทุกทิศทางโดยตั้งฉากกับทิศที่เคลื่อนที่ไปอย่างไรก็ตาม การสั่นของคลื่นในระนาบเดียวในการประยุกต์ใช้แสงจำนวนมากและที่เรียกว่าแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น แต่ในสมบัติทางแสงเราสามารถที่จะพิจารณาแสงโดยใช้สมการคลื่นสเกลาร์โดยให้  $E$  เป็นค่าสเกลาร์ของสนามไฟฟ้าโดยสามารถเขียนจากสมการ (1) ได้เป็น

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad \dots(3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการแก้สมการอย่างง่าย สมการคลื่นระนาบจะสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} E(x, y, z, t) &= \exp[j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{R})] \\ &= \exp[j(\omega t - k_x x - k_y y - k_z z)] \end{aligned} \quad \dots(4)$$

โดยที่  $\omega = 2\pi f$   $\vec{R} = x\vec{a}_x + y\vec{a}_y + z\vec{a}_z$   $\vec{k} = k_x\vec{a}_x + k_y\vec{a}_y + k_z\vec{a}_z$  คือค่าความถี่เชิงมุม, ตำแหน่งเวกเตอร์, และเวกเตอร์คลื่น ตามลำดับ ( $\vec{a}_x, \vec{a}_y, \vec{a}_z$  หมายถึงยูนิตเวกเตอร์ในทิศ x, y และ z) ส่วนของ k (wave number) คำนวณได้ด้วย

$$|\vec{k}| \equiv k \equiv \frac{2\pi}{\lambda} \quad \dots(5)$$

## 2.2 เลเซอร์

เลเซอร์ (laser ย่อมาจากคำว่า Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) เป็นอุปกรณ์ที่ให้กำเนิดลำแสงที่มีลักษณะเฉพาะ ซึ่งพลังงานแสงเลเซอร์สามารถมีคุณสมบัติได้หลากหลาย ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการออกแบบ เลเซอร์ส่วนมากจะเป็นลำแสงที่มีขนาดเล็ก มีการเบี่ยงเบนน้อย (low-divergence beam) และสามารถระบุมุมยาวคลื่นได้ง่าย โดยดูจากสีของเลเซอร์ ถ้าอยู่ในสเปกตรัมที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (visible spectrum)

ลำแสงเลเซอร์ ที่ผ่านทางสื่อนำแสงจะมีความยาวคลื่นเฉพาะ และมีพลังงานเพิ่ม อาจใช้พลังงานไฟฟ้าหรือแสงในหลายความยาวคลื่นในการสร้างเลเซอร์ ซึ่งในการทดลองแต่ละครั้ง ความยาวคลื่นของแสงในแต่ละความยาวคลื่น จะส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติ รูปร่าง และความยาวคลื่นของลำแสงเลเซอร์ที่สร้างออกมา

การค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับเลเซอร์ เกิดขึ้นครั้งแรกเมื่อเดือนพฤษภาคม ปี 1960 โดย Theodore Maiman ที่สถาบันวิจัย ฮิวจ์ (Hughes Research Laboratories) ทุกวันนี้เลเซอร์กลายเป็นอุตสาหกรรมที่ทำรายได้หลายพันล้านดอลลาร์ ผลผลิตจากงานวิจัยเลเซอร์ และกลายเป็นอุปกรณ์ที่มีใช้กันอย่างแพร่หลาย มีให้เห็นอย่างเช่น แผ่นดีวีดี แผ่นซีดี เครื่องเล่นดีวีดี เครื่องอ่านบาร์โค้ด อุปกรณ์ตัดโลหะด้วยเลเซอร์ ฯลฯ จะเห็นได้ว่าเลเซอร์มีการใช้กันอย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นด้านวิทยาศาสตร์ ด้านอุตสาหกรรม ด้านการแพทย์ หรือแม้กระทั่งด้านการทหาร ก็เพราะว่าเลเซอร์สามารถควบคุมความยาวคลื่นตามที่ต้องการได้โดยแสงเลเซอร์มีคุณสมบัติดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

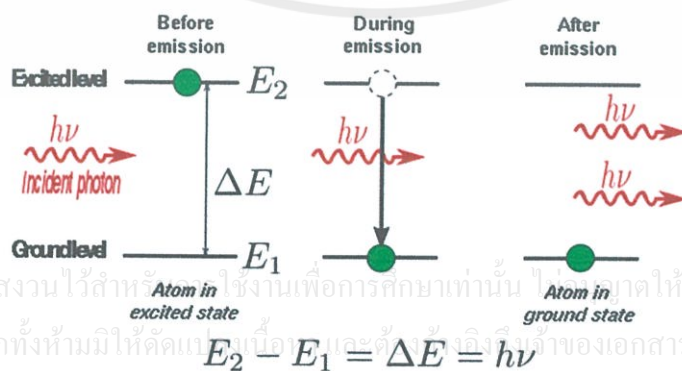
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. มีทิศทางเดียวที่แน่นอน (Directionality) ลำแสงเลเซอร์จะขนานกันไปตลอดระยะทางไกลๆ ไม่มีการบานปลายออก ดังนั้นความเข้มของแสงเลเซอร์จะลดลงน้อยมากในระยะทางไกลๆ

2. เป็นแสงเอกรงค์ (Monochromaticity) แสงเลเซอร์มีความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว แสงกำเนิดแสงที่เราพบเห็นในชีวิตประจำวัน เช่น หลอดไฟฟ้า และ ดวงอาทิตย์จะเป็นแสงสีขาว ถ้าให้แสงสีขาวนี้ผ่านปริซึม จะเห็นแถบสีต่างๆ เรียงกันอย่างต่อเนื่องจากสีม่วงถึงสีแดง เรียกว่า แถบสเปกตรัมของแสงเลเซอร์ เช่น เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน เมื่อให้แสงสีแดงของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนผ่านปริซึม จะไม่มีการแยกเป็นหลายเส้นแต่ยังคงมีเพียง 1 เส้นที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร

3. มีความเจิดจ้า (Brightness) แสงเลเซอร์มีลักษณะโดดเด่นไม่ซ้ำแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่นในเชิงความเข้มสูง และเมื่อลำแสงตกกระทบวัตถุ ก็เกิดความระยิบระยับของลำแสงขึ้น (Laser Speckle) โดยเฉพาะเมื่อวัตถุนั้นมีความหยาบหรือแม้แต่ในบรรยากาศที่มีฝุ่นละอองหรือควันซึ่งเป็นอนุภาคแขวนลอยอยู่อย่าง random ทั้งนี้เนื่องจากแสงเลเซอร์เกิดการสะท้อนแบบไม่มีทิศทางกับอนุภาค หรือผิวของวัตถุ และเกิดการแทรกสอดของลำแสง ทำให้เกิดความระยิบระยับขึ้นจึงเป็นมิติของการมองเห็นโดยใช้ Laser displays แสงเลเซอร์กำลังต่ำๆ เช่น เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ขนาด 1 mW ก็มีความเข้มสูงกว่าแสงพระอาทิตย์ ฉะนั้นถ้าฉายเข้าตามนุษย์โดยตรงแล้ว จะเป็นอันตรายต่อนัยน์ตาถึงตาบอดได้

4. มีความเป็นอาพันธ์ (Coherence) หลอดไฟฟ้าที่เปล่งแสงประกอบด้วยอะตอมที่เล็กจำนวนมาก โดยแต่ละอะตอมจะทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดแสง ดังนั้นแต่ละอะตอมก็ปล่อยแสงออกมาอย่างอิสระซึ่งกันและกัน แสงที่ถูกปล่อยออกมาจากหลอดไฟจึงมีเฟส และความยาวคลื่นต่างๆ กัน ยิ่งกว่านั้นแต่ละคลื่นที่ถูกปล่อยออกมามีทิศทางไม่แน่นอน หรือเป็น random แสงจากแหล่งต้นกำเนิดแสงธรรมดาโดยทั่วไปจะเรียกว่า แสงอินโคฮีเรนซ์ (incoherence light) ต้นกำเนิดของแสงเลเซอร์นอกจากจะให้แสงสีเดียวทุกๆ คลื่นของแสงเลเซอร์จะมีเฟสเดียวกันหมด ดังนั้นแสงเลเซอร์จึงเรียกว่า แสงโคฮีเรนซ์ (coherence light)



รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดเลเซอร์

เมื่ออิเล็กตรอนดูดซับพลังงานทั้งจากแสง (photon) หรือความร้อน (phonon) ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จาก ground level สู่อุณหภูมิ excited level หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะกลับสู่ ground level แล้วปลดปล่อย photon ออกมา

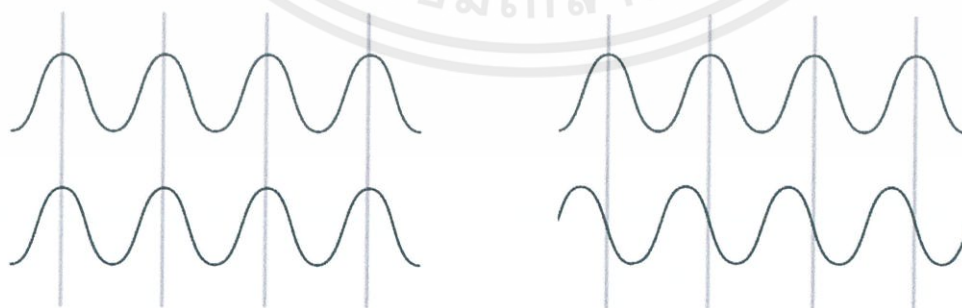
ปัจจุบันได้ใช้เลเซอร์ในการสร้างภาพโฮโลแกรม โดยโฮโลแกรมนั้นเป็นภาพที่บันทึกลงบนฟิล์ม หรือ แผ่นเคลือบด้วยสารสำหรับบันทึกแสง ซึ่งผ่านเทคนิคการบันทึกด้วยการใช้ แสงที่มีเฟสของคลื่นสอดคล้องกัน (coherence) เช่น แสงเลเซอร์ และเมื่อถูกส่องสว่างอย่างเหมาะสม จะแสดงให้เห็นภาพโฮโลแกรม

โฮโลกราฟี เป็นเทคนิคที่ช่วยให้แสงกระจายจากวัตถุที่จะบันทึก แล้วสร้างภาพใหม่ขึ้นมาเพื่อให้ปรากฏเป็นวัตถุอยู่ในตำแหน่งเดิมเมื่อเทียบกับการบันทึก

ถ้าจะกล่าวในคำพูดที่เป็นเชิงวิชาการมากขึ้น ก็อาจกล่าวได้ว่า โฮโลแกรม ก็คือ บันทึกของรูปแบบการแทรกสอดของลำแสง ที่มีหน้าคลื่นสอดคล้องกัน 2 ลำ

### 2.3 โคฮีเรนซ์ (coherence)

เป็นสมบัติของคลื่นที่แสดงถึงความสามารถในการเกิดปรากฏการณ์แทรกสอดกันของคลื่น และยังบ่งบอกถึงคุณภาพการแทรกสอดได้อีกด้วย จะมีโคฮีเรนซ์ได้ต่อเมื่อคลื่นมีเฟสต่างกันคงที่ เช่น แสงเลเซอร์ ส่วนแสงที่เกิดจากแหล่งกำเนิดอื่นๆ เช่น หลอดไฟฟ้านั้น อะตอมจะเปล่งแสงไม่พร้อมกันและทิศทางที่ต่างกันอย่างไม่เป็นระเบียบ จึงไม่มีสมบัติโคฮีเรนซ์ซึ่งโคฮีเรนซ์จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อคลื่นทั้งสองมีความถี่ต่างกันเล็กน้อย หรือกำเนิดจากแหล่งเดียวกันแต่ถูกแยกออกเป็น 2 ลำแสง เป็นต้น แหล่งกำเนิดคลื่นความถี่เดียวกัน ไม่มีจริงในธรรมชาติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.2 แสดงโคฮีเรนซ์ของคลื่น (a)โคฮีเรนซ์ (coherence) และ (b)ไม่โคฮีเรนซ์(incoherence)

## 2.4 การแทรกสอด (interference)

คลื่นสองคลื่นหรือมากกว่า เมื่อมารวมกันที่ตำแหน่งใดๆ จะเป็นไปตามหลักการทับซ้อน (principle of superposition) ซึ่งกล่าวว่าสนามไฟฟ้าลัพท์ที่เกิดจากคลื่นรูปไซน์ (sinusoidal wave) สองคลื่นขึ้นไปมาซ้อนทับกันที่ตำแหน่งและเวลาใดๆ จะเป็นผลรวมทางพีชคณิตของสนามไฟฟ้าของคลื่นแต่ละคลื่น นั่นคือ

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots \quad \dots(6)$$

เมื่อ  $E_1, E_2, E_3$  คือสนามไฟฟ้าของคลื่นแต่ละคลื่น ที่ตำแหน่งและเวลาหนึ่งพิจารณาคลื่นสองคลื่นที่มีความถี่เดียวกัน เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน แต่มีเฟสต่างกัน

เมื่อพิจารณาผลต่างเฟส ถ้าคลื่นทั้งสองมีเฟสตรงข้ามกัน (anti phase) จะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง (destructive interference) และถ้าคลื่นทั้งสองมีเฟสตรงกัน (in phase) จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริม (constructive interference)

ถ้าแหล่งกำเนิดแสงสองแหล่งหรือมากกว่า กำเนิดคลื่นแสงที่มีเฟสสัมพันธ์กันคงที่ตลอดเวลา ซึ่งเรียกว่าแสงโคฮีเรนต์ ความสว่างของแสงรวมจะไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ เกิดกับแถบที่มีความสว่างน้อยและความสว่างมากหรือแถบมืดและแถบสว่าง ที่เรียกว่า ริ้วการแทรกสอด (interference fringes)



รูปที่ 2.3 แสดงการแทรกสอดของแสงบนฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแทรกสอดของคลื่นจะเกิดขึ้นได้นั้น คลื่นที่รวมกันจะต้องมีความยาวคลื่นเท่ากัน และการแทรกสอดจะดำรงอยู่ได้อย่างมั่นคงนั้น (stable) คลื่นที่รวมกันจะต้องมีความสัมพันธ์กันทางเฟสคงที่

(constant phase relationship) คลื่นที่มีความสัมพันธ์กันทางเฟสคงที่นี้ เรียกว่า โคฮีเรนซ์ (coherence) ถ้าคลื่นจากสองแหล่งไม่มีเฟสที่สัมพันธ์กัน เรียกว่า อินโคฮีเรนซ์ (incoherence)

## 2.5 โฮโลกราฟี (Holography)

โฮโลกราฟี (Holography) หมายถึง กระบวนการสร้างภาพโฮโลแกรม ซึ่งเป็นภาพที่บันทึกลงบนฟิล์ม หรือ แผ่นเคลือบด้วยสารสำหรับบันทึกแสง ซึ่งผ่านเทคนิคการบันทึกด้วยการใช้ แสงที่มีเฟสของคลื่นสอดคล้องกัน (coherence) เช่น แสงเลเซอร์

โฮโลกราฟี เป็นเทคนิคที่ช่วยให้แสงกระจายจากวัตถุที่จะบันทึก และได้ถูกสร้างขึ้นใหม่ต่อมา เพื่อให้ปรากฏเป็นวัตถุอยู่ในตำแหน่งเดิมเมื่อเทียบกับการบันทึก การเปลี่ยนแปลงรูปแบบตำแหน่ง และทิศทางของการระบบการมองเห็นช่วยให้แสงกระจายจากวัตถุที่จะบันทึกและได้ถูกสร้างขึ้นใหม่ เพื่อให้ปรากฏเป็นวัตถุอยู่ในตำแหน่งเดิมเมื่อเทียบกับการบันทึก

ถ้าจะกล่าวในคำพูดที่เป็นเชิงวิชาการมากขึ้น ก็อาจกล่าวได้ว่า โฮโลแกรม ก็คือ บันทึกของรูปแบบการแทรกสอดของลำแสง ที่มีหน้าคลื่นสอดคล้องกัน 2 ลำ

ภาพที่ถูกสร้างขึ้นมาจากการบันทึกข้อมูลด้วย แสงเลเซอร์ โดยบันทึก ร็วรอยของการแทรกสอด (Interference Pattern) ของแสงเลเซอร์ ทำให้เราสามารถมองเห็นภาพที่แตกต่างจาก ภาพทั่วไป ซึ่งภาพทั่วไปไม่มีความลึกทางมิติของภาพเป็นภาพแบนๆ ง่ายๆ โฮโลแกรมที่ได้จากเลเซอร์จะทำให้ภาพนั้นดูสวยงามมากขึ้น อีกทั้งยังมีประโยชน์ในด้านอื่นๆ อีกด้วย

โฮโลแกรมนี้ถูกค้นพบโดยเดนนิส กาเบอร์ (Dennis Gabor, 1900-1979) วิศวกรไฟฟ้าชาวฮังการี ในวันที่อีสเตอร์ ปี ค.ศ. 1947 โดยกาเบอร์ได้ค้นพบหลักการของโฮโลกราฟีโดยบังเอิญ ในระหว่างที่พัฒนาปรับปรุงคุณภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่บริษัท British Thomson-Houston ที่เมือง Rugby ประเทศอังกฤษจากการค้นพบนี้ กาเบอร์ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ในปี ค.ศ. 1971 เทคนิคที่คิดค้นเดิมยังใช้อยู่ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่เป็นที่ยุ้กันกันในชื่อภาพสามมิติอิเล็กตรอน แต่ภาพสามมิติเป็นเทคนิคแสงซึ่งไม่ได้มีการพัฒนาอย่างจริงจัง จนกระทั่งมีการพัฒนาของเลเซอร์ในปี 1960

โฮโลแกรมแสงที่ใช้ได้จริงชิ้นแรกนั้นบันทึกอยู่ในรูปของวัตถุ 3D ซึ่งถูกสร้างขึ้นในปี 1962 โดย Yuri Denisyuk ในสหภาพโซเวียต และโดย Emmett Leith และ Juris Upatnieks ที่ University of Michigan ประเทศสหรัฐอเมริกา ความก้าวหน้าในเทคนิคการประมวลผลโฟโตเคมีคัลเป็นการผลิต เพื่อแสดงภาพโฮโลแกรมที่มีคุณภาพสูง ซึ่งทำได้สำเร็จโดย Nicholas J. Phillips การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โฮโลแกรม คือ ภาพที่ได้จากการบันทึก สามารถมองเห็นได้ด้วยการส่องสว่างที่มีความยาวคลื่นเดียวกัน (หรือใกล้เคียงกับแสงที่ใช้สร้างโฮโลกราฟี) หรือแสงที่มีสภาพเฟสของคลื่นสอดคล้องกันในระดับหนึ่ง ถึงจะมองเห็นภาพ 3 มิติได้

นอกจากนี้ ยังอาจแบ่งโฮโลแกรมออกได้เป็น transmission hologram, reflection hologram, image-plane hologram, และอื่นๆ อีกหลายประเภท

ที่โฮโลแกรมหลายชนิดนั้นสามารถทำได้ การส่งผ่านของโฮโลแกรมเช่นการผลิตโดย Leith และ Upatnieks ซึ่งถูกทำให้มองเห็นได้โดยส่องแสงเลเซอร์ผ่านวัตถุ และมองภาพที่ถูกสร้างขึ้นใหม่จากโฮโลแกรมด้านตรงข้ามของแหล่งที่มา การปรับแต่งภายหลังการ หรือ “การส่งผ่านแถบสี” โฮโลแกรม ช่วยให้แสงสว่างโดยแสงสีเขียวกว่าโดยเลเซอร์ แถบสีโฮโลแกรมเห็นได้ทั่วไปในปัจจุบันบนบัตรเครดิต ซึ่งเป็นคุณลักษณะด้านความปลอดภัยและในการบรรจุสินค้า รุ่นนี้ของการส่งผ่านแถบสีโฮโลแกรมเกิดขึ้นโดยทั่วไป เป็นรูปแบบผิวในฟิล์มพลาสติกและวัตถุรวมเคลือบอะลูมิเนียมสะท้อนแสงที่ให้แสงสว่างจาก “ด้านหลัง” เพื่อสร้างภาพของวัตถุ

## 2.6 วิธีการทำงานของโฮโลกราฟี

โฮโลกราฟีเป็นเทคนิคที่ช่วยให้สนามของแสงซึ่งโดยทั่วไปผลิตผลของแหล่งกำเนิดแสงที่กระเจิงออกจากวัตถุที่จะได้รับการบันทึกและสร้างขึ้นใหม่ในภายหลังเมื่อสนามของแสงที่เป็นต้นฉบับดั้งเดิมเป็นปัจจุบันนั้นไม่มีอีกต่อไปเนื่องจากขาดหายไปของวัตถุที่เป็นต้นฉบับดั้งเดิม

หลักการของ Hologram ซึ่งโฮโลแกรม เป็นภาพที่มีลักษณะ 3 มิติ ซึ่งแตกต่างจากภาพ 2 มิติ เช่น ภาพถ่าย ภาพวาด จอคอมพิวเตอร์ โทรทัศน์ เป็นต้น ภาพเหล่านี้จะเป็นภาพ 2 มิติ เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดแสง ไปกระทบผิวของภาพถ่าย, ภาพวาด ก็จะสะท้อนกลับมายังที่ตา ทำให้มองเห็นภาพเป็น 2 มิติ

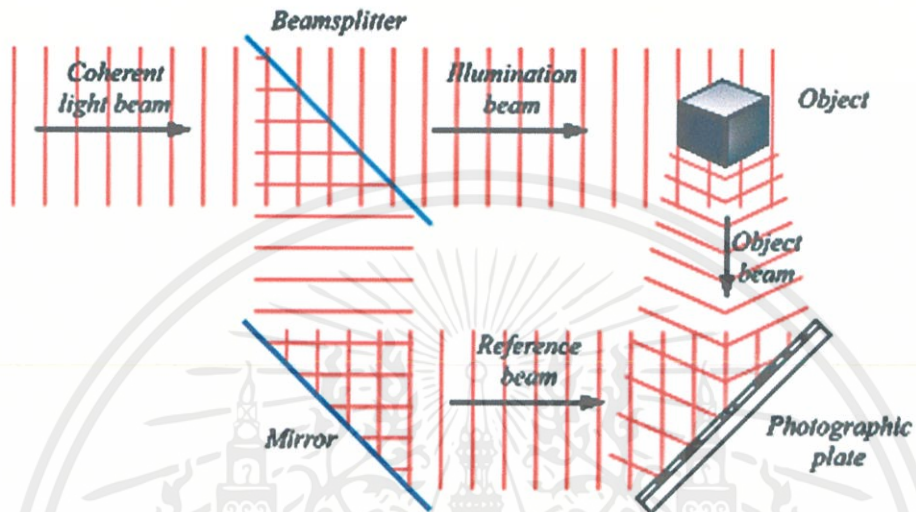
แต่ภาพโฮโลแกรมจะใช้หลักการสร้างภาพให้มีการแทรกสอดของแสงที่มากกระทบรูปภาพ โดยการฉายแสงเลเซอร์จากแหล่งเดียวกัน แยกเป็น 2 ลำแสง ลำแสงหนึ่งเป็นลำแสงอ้างอิงเล็งตรงไปที่แผ่นฟิล์ม อีกลำแสงหนึ่งเล็งไปที่วัตถุและสะท้อนไปยังฟิล์ม แสงจากทั้งสองแหล่งจะถูกบันทึกไว้บนฟิล์มในรูปแบบของการแทรกสอด (Interference Pattern) ซึ่งมองไม่คล้ายกับรูปของวัตถุต้นแบบ ก่อให้เกิดภาพเสมือน (Virtual image) ขึ้นมาตามมุมของแสงที่มากกระทบ ทำให้ตาของเรารับแสง

อีกด้านหนึ่งของแผ่น Hologram เกิดเห็นภาพ 3 มิติขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

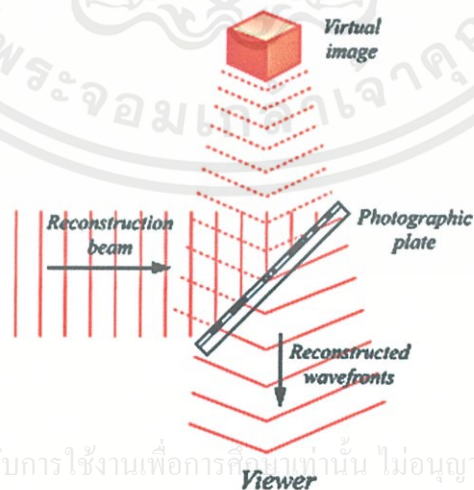
ไม่ว่ากรณีใด การสร้างโฮโลแกรมแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้ อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1) การบันทึกภาพ (recording of image) เป็นการบันทึกแถบการสอดแทรกเชิงซ้อน (Complex interference patterns) ซึ่งเกิดจากที่แต่ละแสงเลเซอร์ 2 ลำแสงซ้อนทับกันอยู่ (Superposition) แถบการสอดแทรกเชิงซ้อนนี้จะถูกบันทึกไว้บนฟิล์มถ่ายรูป (Photographic film)



รูปที่ 2.4 แสดงการบันทึกภาพ (recording of image)

(2) การสร้างภาพ (reconstruction of image) เป็นการสร้างภาพ 3 มิติ ขึ้นจากแผ่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.5 แสดงการสร้างภาพ (reconstruction of image)

เมื่อใช้กล้อง CCD ในการบันทึกภาพ จะได้ภาพที่เป็นดิจิทัล (digital) เพื่อถ่ายต่อการเก็บข้อมูลและลดการสิ้นเปลืองแผ่นบันทึก รวมทั้งยังสามารถนำไปวิเคราะห์หรือปรับปรุงข้อมูลได้ง่ายขึ้นด้วย

### 2.6.1 ดิจิตอลโฮโลกราฟี (Digital Holography)

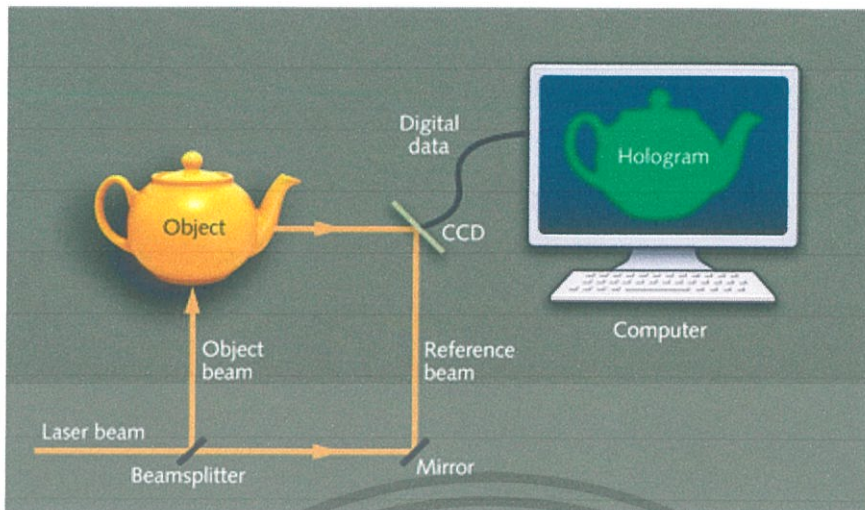
Digital holography คือเทคโนโลยีที่พัฒนาจากโฮโลกราฟีจากการถ่ายภาพแล้วบันทึกลงบนแผ่นฟิล์มเพื่อจะได้ภาพที่เป็นสามมิติ โดยเมื่อยุคสมัยเปลี่ยนไปโดยเทคโนโลยีได้ก้าวหน้าขึ้นไปมากและคอมพิวเตอร์ก็เข้ามามีบทบาทในการชีวิตประจำวันมากขึ้น โดยความคิดพื้นฐานนั้นจะทำการบันทึกข้อมูลรูปภาพโดยใช้เซนเซอร์ในอิเล็กทรอนิกส์ เช่น CCD หรืออุปกรณ์อื่นๆ ที่มีคุณสมบัติในการรับสัญญาณได้คล้ายคลึงกัน แทนที่จากเดิมที่จะต้องทำการบันทึกบนแผ่นฟิล์มถ่ายภาพ โดยการบันทึกด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โฮโลแกรมแบบดิจิทัลจะถูกนำมาเก็บข้อมูลไว้ในไฟล์ดิจิทัลซึ่งสามารถเปิดได้โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ดิจิตอลหรือคอมพิวเตอร์

โดยมีข้อดีที่มากมายสำหรับการใช้การบันทึกแบบอิเล็กทรอนิกส์ เช่น การบันทึกดิจิทัลโฮโลแกรมสามารถเก็บข้อมูลไว้ได้นานเพราะสามารถเก็บไว้ในตัวเก็บข้อมูลดิจิทัลได้อย่างเช่น ฮาร์ดดิสก์ แฟลชไดท์ และอีกมากมาย รูปภาพดิจิทัลนั้นสามารถนำไปทำซ้ำแล้วบันทึกภาพไว้ใช้ได้ทุกที่และทุกเวลาที่มีเครื่องรับข้อมูลดิจิทัล หรือ การบันทึกภาพแบบดิจิทัลต้องการเพียงแค่อุปกรณ์บันทึกภาพเท่านั้นไม่จำเป็นต้องสูญเสียตัวกลางที่ใช้ในการบันทึกภาพที่ได้จากโฮโลกราฟีคือฟิล์มถ่ายภาพ และอื่นๆ อีกมาก

### 2.6.2 หลักการทำงานของดิจิทัลโฮโลกราฟี

แนวคิดของการบันทึกดิจิทัลโฮโลแกรมดังแสดงในรูป โดยคลื่นอ้างอิงและคลื่นที่สะท้อนมาจากวัตถุจะเกิดการแทรกสอดกันที่ระนาบของหน้าตัวเซนเซอร์ Charged Couple Device (CCD) ผลของโฮโลแกรมที่เกิดจะถูกบันทึกและเก็บไว้ด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ วัตถุคือรูปแบบสามมิติทั่วไปที่มีพื้นผิวที่สะท้อนให้เห็นกระจายอยู่ที่จากที่ CCD ภาพจะแสดงอยู่ในระนาบที่บันทึกในรูปแบบที่เบลอทีเหมือนไม่ได้โฟกัสภาพ เนื่องจากการเลี้ยวเบนไปตามระยะทางที่แพร่ไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการบันทึกภาพของดิจิตอลโฮโลกราฟี

### 2.6.3 หลักการ Reconstruction โดยวิธี Angular spectrum

โดยทั่วไปแล้ว การสร้างภาพใหม่ของภาพที่ถ่ายได้จากระบบดิจิตอลโฮโลกราฟีโดยใช้โปรแกรม MATLAB เป็นกระบวนการทำให้มีความชัดเจน ใช้หลักการเหมือนรวมแสงที่กระจายไปให้กลับมาเป็นรูปร่างของวัตถุเดิมที่ถ่าย เปรียบเสมือนการโฟกัสภาพ

การสร้างภาพใหม่โดยวิธี Angular Spectrum คือวิธีการสร้างภาพใหม่ที่ใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์เข้ามาอธิบายสนามทางแสงของระนาบการแพร่ของแสง รวมทั้งยังใช้ในการสร้างภาพขึ้นใหม่ในดิจิตอลโฮโลแกรม นอกจากนี้หากทำการโฟกัสภาพหลายๆระยะ แล้วนำภาพที่ได้มาเรียงต่อกันเป็นชั้น จะสามารถสร้างเป็นภาพ 3 มิติได้อีกด้วย

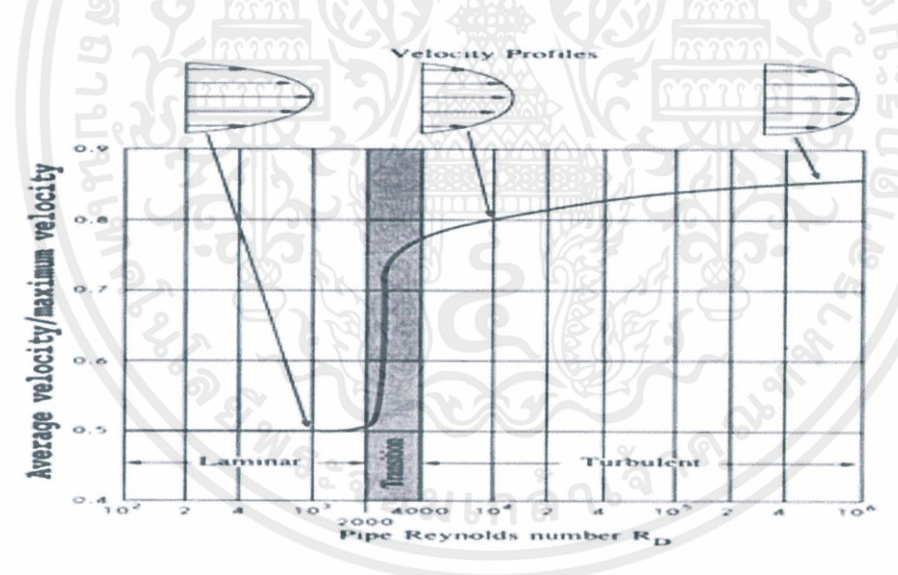
วิธีการนี้จะใช้ Fourier transform และ inverse Fourier transformation เพื่อสร้างดิจิตอลโฮโลแกรมเช่นเดียวกับวิธี Huygens convolution แต่จะมีข้อดีกว่าในระยะเวลาของการสร้างภาพใหม่ วิธีการ Angular Spectrum สามารถสร้างภาพขึ้นใหม่ได้อย่างถูกต้องในระยะเวลาที่วัตถุอยู่ใกล้ๆ เมื่อเทียบกับวิธีการของ Huygens convolution

## 2.7 ของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารหนึ่งของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีปริมาณคงตัวและมีรูปร่างตามภาชนะที่บรรจุ ส่วนก๊าซเป็นอีกสถานะหนึ่งของสสาร มีรูปร่างและปริมาตรไม่คงตัว ขึ้นกับภาชนะที่บรรจุ ทั้งของเหลวและก๊าซสามารถไหลจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งได้ จึงเรียกของเหลวและก๊าซว่า ของไหล (fluid) สมบัติของของไหลได้แก่ ความหนาแน่น ความดัน ความตึงผิวและความหนืดพฤติกรรมของของไหลทั้งที่อยู่นิ่ง

และเคลื่อนที่อธิบายได้ด้วยหลักและกฎทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องคือ ความหนาแน่น ความดัน แรงลอยตัว ความตึงผิว ความหนืด และพลศาสตร์ของของไหลและคุณสมบัติอื่นๆ

- ความหนาแน่น (Density,  $\rho$ ) คือ มวล (m) ของสารนั้นต่อปริมาตร (V)
- ความหนืด (Viscosity,  $\mu$ ) คือ คุณสมบัติการต้านการเคลื่อนที่ของของไหล เป็นผลมาจากแรงความหนืดพลวัตของของไหลจะลดลงเมื่ออุณหภูมิมากขึ้น เพราะเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นจะทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของของไหลลดลง ดึงดูระหว่างโมเลกุลและการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมระหว่างโมเลกุลของของเหลว
- น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight,  $\rho\gamma$ ) คือ ความหนาแน่น คูณกับค่าอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) หรือน้ำหนัก (mg) ต่อปริมาตร
- ความดัน (pressure) คืออัตราส่วนของแรงต่อพื้นที่ที่ตั้งฉากกับแนวแรง
- แรงตึงผิว คือ แรงที่เกิดขึ้นบริเวณที่ผิวของของไหลสัมผัสกับของไหลอื่นหรือกับผิวของแข็ง โดยมีพลังงานเพียงพอต่อการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ซึ่งมีขนาดสัมพันธ์กับแรงยึดติดและแรงเกาะติด ทำให้เกิดเป็นลักษณะคล้ายๆ กับแผ่นบางๆ ที่สามารถต้านแรงดึงได้เล็กน้อย



รูปที่ 2.7 แสดง velocity profile ของการไหล

จำนวนเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) เป็นเลขดัชนีที่บ่งบอกสภาพปรากฏการณ์การไหลของของไหล ซึ่งเป็นสัดส่วนของ inertia/viscous จำนวนเลขเรย์โนลด์จะมีค่าขึ้นอยู่กับความเร็ว การไหล ความหนืด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ และความหนาแน่นของของไหล เราอาจเขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวได้เป็น

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad \dots(7)$$

เมื่อ  $Re$  คือ จำนวนเลขเรย์โนลด์ (Reynold's Number)

$V$  คือ ความเร็วการไหล (m/s)

$D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (m)

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล ( $\text{kg/m}^3$ )

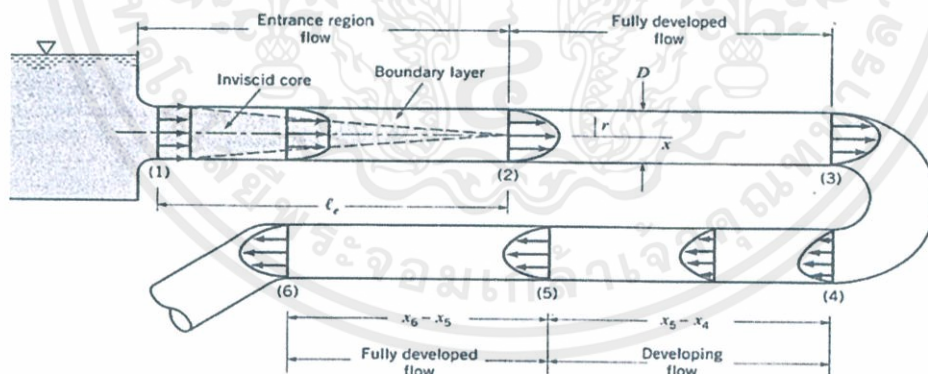
$\mu$  คือ ความหนืดของของไหล ( $\text{kg/m.s}$ )

จำนวนเลขเรย์โนลด์ไม่มีหน่วย และมีความสำคัญอย่างมาก กล่าวคือจำนวนเลขนี้ใช้เป็นตัวกำหนดรูปแบบการไหลของของไหลว่าเป็นแบบใด เช่น

$Re$  อยู่ในช่วง 0 - 2000 สภาพการไหลเป็นแบบ Laminar Flow

$Re$  อยู่ในช่วง 2001 - 4000 สภาพการไหลเป็นแบบ Transition Zone คือ มีการไหล 2 แบบ คือ Laminar + Turbulent

$Re$  มากกว่า 4000 สภาพการไหลเป็นแบบ Turbulent Flow



รูปที่ 2.8 แสดงการไหลของของไหลภายในท่อ

ในกรณีที่ของไหล ไหลเข้าท่อโดยให้การไหลเป็นแบบ Uniform flow ดังรูป เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของความหนืดพบว่า ในกรณีของไหลหนืดนั้น จะมีผลกระทบจากแรงเฉือน ซึ่งทำให้เกิดชั้น Boundary layers ขึ้น การไหลในช่วงนี้จะมีแบ่งออกเป็น 2 ส่วนชัดเจน เราเรียกระยะทางที่ของไหล

ไหลเข้าว่าเป็นช่วง Entrance length,  $l_e$  หลังจากช่วงนี้การไหลจะเปลี่ยนเป็นแบบ Fully developed ซึ่งการไหลในช่วงนี้ ความเร็วจะไม่เป็นเปลี่ยนแปลงกับระยะทางตามแนวการไหล ( $x$ )

การคำนวณหาระยะที่เกิด fully developed flow สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

...(8)

...(9)

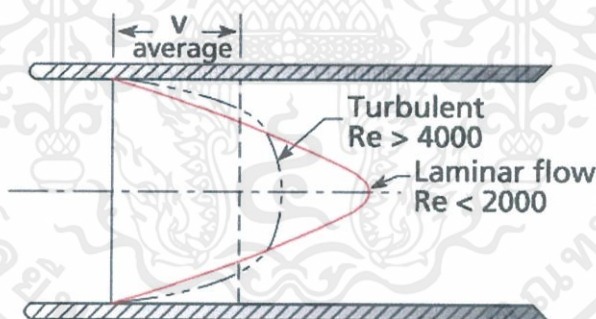
$$\frac{l_e}{D} = 0.06 \text{Re} \quad ; \text{Laminar flow}$$

$$\frac{l_e}{D} = 4.4(\text{Re})^{1/6} \quad ; \text{Turbulent flow}$$

ซึ่งการที่จะเกิด fully developed flow นั้น  $X_3 - X_2 > l_e$  or  $X_5 - X_4 > X_6 - X_5$

เมื่อ  $l_e$  คือ ระยะ Entrance length (m)

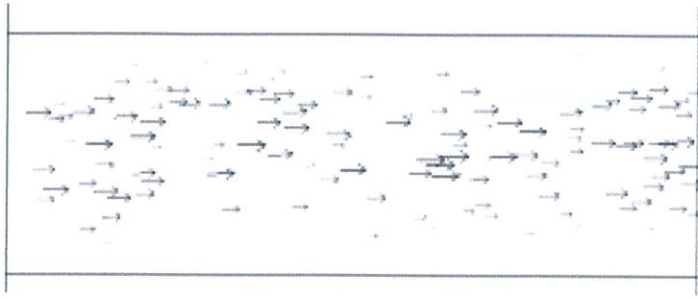
$D$  คือ Diameter ของท่อ หน่วย (m)



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของผิวน้ำภายในท่ออธิบายด้วยเลขเรย์โนลด์

หากมีวัตถุทรงกลมอยู่ในของไหลที่มีความหนาแน่น ความเร็วและความหนืด มากพอจะทำให้สามารถผลักวัตถุที่ลอยอยู่ภายในให้เคลื่อนที่ไปกับของไหลได้ เป็นปฏิสัมพันธ์ hydrodynamics force ซึ่งเป็นกิริยาของของไหลกับอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงการไหลของวัตถุด้วยของไหลภายในท่อ

วัตถุที่อยู่ใกล้ผนังท่อ(wall) จะได้รับผลจากความหนืดของของไหลทำปฏิกิริยากับผนัง ทำให้บริเวณนี้ เคลื่อนที่ช้ากว่าบริเวณกลางท่อ

การเคลื่อนที่ของไหลสามารถอธิบายได้โดยสมการ Navier-Stokes equation โดยที่มีความหนืด ดังสมการ

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho v \cdot \nabla v = -\nabla p + \mu \nabla^2 v \quad \dots(10)$$

สมการที่เกี่ยวข้องกับการไหลผ่านโดยของไหล คือ

$$\nabla^2 \omega = 0 \quad \dots(11)$$

$$\nabla^2 p = 0 \quad \dots(12)$$

ซึ่งเกี่ยวข้องกับ การไหลเวียน(vorticity) และ ความดัน(pressure)

ในการไหลแบบ Stokes flow ใน 2 มิติฟังก์ชันกระแส  $\psi(x, y)$  ซึ่งเกี่ยวข้องกับ vorticity สามารถเขียนได้เป็น

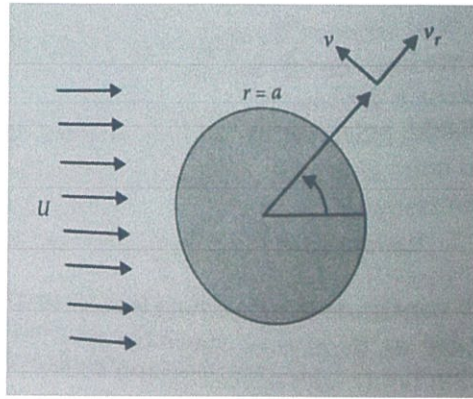
$$\nabla^4 \psi = 0 \quad \dots(13)$$

พิจารณากระแสของไหลด้วยความเร็ว  $v$  ผ่านทรงกลมรัศมี  $r=a$  จะได้ความเร็วในระบบ spherical coordinate

$$v_r = \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \quad \dots(14)$$

$$v_\theta = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad \dots(15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงของไหลเคลื่อนที่ผ่านวัตถุทรงกลม

กฎของสโตก คือ เมื่อวัตถุทรงกลมตันเคลื่อนที่ในของไหลที่มีความหนืด แรงต้านเนื่องจากความหนืด ( $F$ ) กระทำต่อวัตถุทรงกลมนั้นเป็นปฏิภาคโดยตรงกับอัตราเร็ว  $v$  ของทรงกลมเทียบกับของไหล ซึ่งพิสูจน์โดย เซอร์ จอร์จ สโตก (Sir George Stoke) ในปี ค.ศ. 1845 เรียกว่า กฎของสโตก (Stoke's law) กล่าวคือ

$$F = 6\pi\mu r v \quad \dots(16)$$

พิจารณาทรงกลมตันมวล  $m$  รัศมี  $r$  ความหนาแน่น  $\rho$  ที่ตกอยู่ในของไหลที่มีความหนืด  $\mu$  ความหนาแน่น  $\rho_0$  เริ่มต้นทรงกลมจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วจะลดลงเรื่อยๆ จนสุดท้ายเป็นศูนย์ ต่อจากนี้ทรงกลมจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่เรียกว่า อัตราเร็วปลาย (terminal speed) " $v_t$ " ซึ่งขณะนี้แรงลัพธ์กระทำต่อทรงกลมเป็นศูนย์นั่นเอง กล่าวคือ

แรงพยุง + ขนาดแรงต้านของเหลว = ขนาดน้ำหนักของทรงกลม

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_0 g + 6\pi\mu r v_t = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g \quad \dots(17)$$

จะได้

$$v_t = \frac{2}{9} \frac{r^2 g}{\mu} (\rho - \rho_0) \quad \dots(18)$$

ดังนั้น ในการหาค่า  $\mu$  ของของเหลว เราอาจใช้วิธีปล่อยทรงกลมที่เหมาะสมให้ตกในของเหลวนั้นๆ โดยเราสามารถวัดค่าอัตราเร็วปลายได้ก็จะสามารถหาค่า  $\mu$  ของของเหลวได้

เอกลิขสิทธิ์ของเนื้อหาและข้อสอบนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนืด ( $\mu$ ) ถือได้ว่าเป็นแรงเสียดทานภายในของของไหลในขณะที่มีการเคลื่อนที่ มีหน่วยเป็น นิวตัน·วินาที·เมตร<sup>-2</sup> ในหน่วย ซึ่งได้ตั้งเป็นหน่วยใหม่ว่า ปอยส์ (poise) เพื่อเป็นเกียรติแก่ปัวเซย์ (Poiseuille) โดยที่

$$1 \text{ poise} = 10^{-1} \text{ Nsm}^{-2}$$

ตารางที่ 2.1 ค่าความหนืดของน้ำกับอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (°C)	$\mu$ ของน้ำ ( $10^{-2}$ poise)
0	1.792
20	1.005
40	0.656
60	0.469
80	0.357
100	0.284

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าความหนืดของน้ำลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม

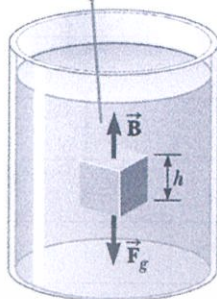
## 2.8 แรงลอยตัวและหลักการของอาคิมีดีส

แรงในทิศทางที่ของไหลกระทำต่อวัตถุเมื่อจุ่มวัตถุลงในของไหล เรียกว่า แรงลอยตัว (buoyant force) ซึ่งขนาดของแรงลอยตัวที่กระทำต่อวัตถุหนึ่งๆจะเท่ากับน้ำหนักของของไหลที่ถูกแทนที่ด้วยวัตถุนั้นเสมอ เรียกว่า หลักของอาคิมีดีส

พิจารณารูปทรงลูกบาศก์ตันที่จุ่มลงในของเหลว ดังรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The buoyant force on the cube is the resultant of the forces exerted on its top and bottom faces by the liquid.



รูปที่ 2.12 แรงภายนอกที่กระทำต่อรูปทรงลูกบาศก์ที่จุ่มอยู่ในของไหลได้แก่ แรงโน้มถ่วง  $\vec{F}_g$  และแรงลอยตัว  $\vec{B}$

ความดัน  $P_{bot}$  ที่ด้านล่างของลูกบาศก์นั้นจะมากกว่าความดัน  $P_{top}$  ที่ด้านบนของลูกบาศก์อยู่เท่ากับ  $\rho_{fluid}gh$  เมื่อ  $h$  คือความสูงของลูกบาศก์ และ  $\rho_{fluid}$  คือความหนาแน่นของของไหล ความดันที่ด้านล่างของลูกบาศก์ทำให้เกิดแรงในทิศขึ้นเท่ากับ  $P_{bot}A$  เมื่อ  $A$  คือพื้นที่ผิวของด้านล่างของลูกบาศก์ ความดันที่ด้านบนของลูกบาศก์ทำให้เกิดแรงในทิศลงเท่ากับ  $P_{top}A$  โดยแรงลอยตัว  $B$  เป็นผลมาจากแรงทั้งสองนี้กระทำต่อลูกบาศก์ ซึ่งมีขนาดเท่ากับ

$$B = (P_{bot} - P_{top})A = (\rho_{fluid}gh)A \quad \dots(19)$$

$$B = \rho_{fluid}gV_{disp} \quad \dots(20)$$

เมื่อ  $V_{disp} = Ah$  เป็นปริมาตรของของไหลที่ถูกแทนที่ด้วยลูกบาศก์ เนื่องจากผลคูณระหว่าง  $\rho_{fluid}V_{disp}$  นั้นเท่ากับมวลของของไหลที่ถูกแทนที่ด้วยวัตถุนั้น

$$B = Mg \quad \dots(21)$$

เมื่อ  $Mg$  คือน้ำหนักของของไหลที่ถูกแทนที่ด้วยลูกบาศก์ ผลลัพธ์ที่ได้นี้สอดคล้องกับหลักการของ อาร์คิมิดีส

สถานการณ์ที่เกิดกับวัตถุ นั้นคือ กรณีวัตถุจุ่มลงในของไหล และกรณีวัตถุลอยหรือจุ่มลงบางส่วนในของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่1: วัตถุทั้งหมดจมลงในของไหล เมื่อวัตถุทั้งก้อนจมลงไปใของไหลที่มีความหนาแน่น  $\rho_{\text{fluid}}$  ปริมาตรของของไหลที่ถูกแทนที่  $V_{\text{disp}}$  เท่ากับปริมาตรของวัตถุ  $V_{\text{obj}}$  ขนาดของแรงลอยตัวในทิศขึ้นจะเป็น

$$B = \rho_{\text{fluid}} g V_{\text{obj}} \quad \dots(22)$$

ถ้าวัตถุมีมวล  $M$  และความหนาแน่น  $\rho_{\text{obj}}$  น้ำหนักของวัตถุมีค่าเท่ากับ

$$F_g = Mg = \rho_{\text{obj}} g V_{\text{obj}} \quad \dots(23)$$

และแรงลัพธ์ที่กระทำกับวัตถุจะมีค่าเป็น

$$B - F_g = (\rho_{\text{fluid}} - \rho_{\text{obj}}) g V_{\text{obj}} \quad \dots(24)$$

ดังนั้น ถ้าความหนาแน่นของวัตถุน้อยกว่าความหนาแน่นของของไหล แรงโน้มถ่วงในทิศลงจะน้อยกว่าแรงลอยตัวในทิศขึ้น และวัตถุที่ไม่ได้รับการพยุงจะมีความเร่งในทิศขึ้นถ้าความหนาแน่นของวัตถุมากกว่าความหนาแน่นของของไหล แรงลอยตัวในทิศขึ้นจะน้อยกว่าแรงโน้มถ่วงในทิศลง และวัตถุที่ไม่ได้รับการพยุงจะจมลง ถ้าความหนาแน่นของวัตถุที่จมเท่ากับความหนาแน่นของของไหล แรงลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุเป็นศูนย์ ซึ่งทำให้วัตถุอยู่ในสภาวะสมดุล ดังนั้นทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุที่จมในของไหลจึงถูกระบุด้วยความหนาแน่นของวัตถุและความหนาแน่นของของไหลเท่านั้น

กรณีที่2: วัตถุลอยหรือจมบางส่วนในของไหล ต่อมาให้พิจารณาวัตถุที่มีปริมาตร  $V_{\text{obj}}$  และความหนาแน่น  $\rho_{\text{fluid}} < \rho_{\text{obj}}$  ลอยอยู่อย่างสมดุลบนผิวหน้าของของไหล และบางส่วนของวัตถุนี้จมอยู่ในของไหล ในกรณีนี้แรงลอยตัวในทิศขึ้นที่ถูกสมดุลด้วยน้ำหนักในทิศลงเป็นแรงที่กระทำกับวัตถุ ถ้า  $V_{\text{disp}}$  เป็นปริมาตรของของไหลที่ถูกแทนที่ด้วยวัตถุ แล้วแรงลอยตัวจะมีขนาด

$$B = \rho_{\text{fluid}} g V_{\text{disp}} \quad \dots(25)$$

เพราะว่าน้ำหนักของวัตถุเป็น

$$F_g = Mg = \rho_{\text{obj}} g V_{\text{obj}} \quad \dots(26)$$

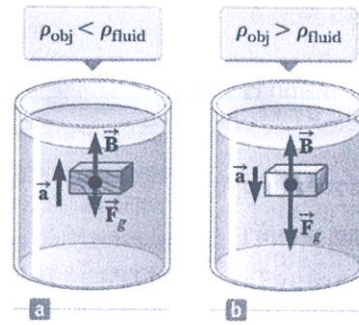
และ เพราะค่า  $F_g = B$  เราจะได้ว่า

$$\rho_{\text{fluid}} g V_{\text{disp}} = \rho_{\text{obj}} g V_{\text{obj}} \quad \dots(27)$$

หรือ

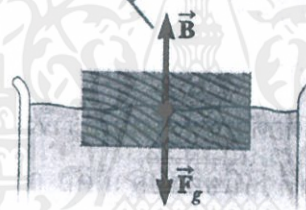
$$\frac{V_{\text{disp}}}{V_{\text{obj}}} = \frac{\rho_{\text{obj}}}{\rho_{\text{fluid}}} \quad \dots(28)$$

สมการนี้แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนของปริมาตรที่วัตถุจมอยู่ใต้ผิวหน้าของของไหลกับปริมาตรของวัตถุทั้งหมดจะเท่ากับอัตราส่วนของความหนาแน่นของวัตถุกับความหนาแน่นของของไหล



รูปที่ 2.13 (a) วัตถุจมอยู่ในของไหลทั้งหมดโดยวัตถุมีความหนาแน่นน้อยกว่าของไหล ทำให้การจมนี้อมีแรงลัพธ์ในทิศขึ้น (b) วัตถุจมอยู่ในของไหลทั้งหมดโดยวัตถุมีความหนาแน่นมากกว่าของไหล ทำให้การจมนี้อมีแรงลัพธ์ในทิศลง และทำให้วัตถุจม

Because the object floats in equilibrium,  $B = F_g$



รูปที่ 2.14 วัตถุลอยอยู่บนผิวของไหลมีแรงมากระทำสองแรง แรงโน้มถ่วง  $\vec{F}_g$  และแรงลอยตัว  $\vec{B}$

## 2.9 จลศาสตร์

ในแต่ละวันเรามองเห็นสิ่งต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเทียบกับสิ่งหนึ่งเสมอ เช่น ยวดยานเคลื่อนที่ไปตามถนน เรือแล่นไปตามแม่น้ำลำคลอง คนและสัตว์เดินไปมา

การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของวัตถุหนึ่งเทียบกับวัตถุหนึ่ง ก็คือ การเคลื่อนที่ของวัตถุนั้นเทียบกับวัตถุที่ใช้เปรียบเทียบ ดังนั้น การเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุจึงเกี่ยวข้องกับ ระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่และเวลาที่ผ่านไปในช่วงของการเคลื่อนที่นั้น

สิ่งที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของวัตถุ เช่น ความเร็ว ความเร่ง ระยะทางที่ได้จากการย้ายตำแหน่งของวัตถุโดยเรียกว่า การขจัด (displacement)

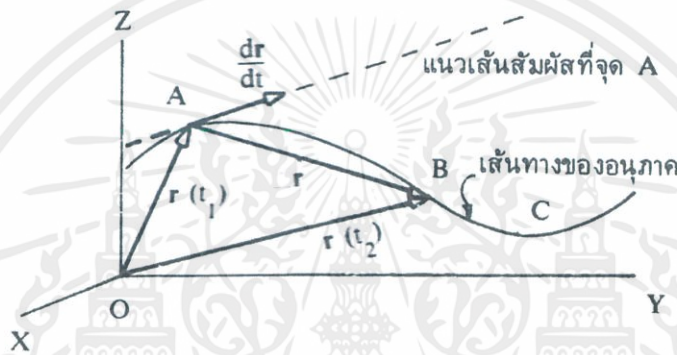
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.1 ความเร็ว ในชีวิตประจำวันเรามักใช้คำว่า อัตราเร็ว (speed) และ ความเร็ว (velocity) สับสนปนกันไป จนดูเหมือนว่าคำทั้งสองนี้มีความหมายอย่างเดียวกัน แต่ในฟิสิกส์คำทั้ง

สองนี้มีความหมายแตกต่างกันและปกติจะไม่สามารถใช้แทนกันได้ กล่าวโดยสรุปได้ว่า ความเร็วเป็น ปริมาณเวกเตอร์ ส่วน อัตราเร็วเป็นปริมาณสเกลาร์

สมมติมีอนุภาคอยู่ที่ตำแหน่ง A เมื่อเวลา  $t_1$  และเคลื่อนที่ไปถึงตำแหน่ง B เมื่อเวลา  $t_2$  โดย ให้  $r(t_1)$  และ  $r(t_2)$  เป็นเวกเตอร์บอกตำแหน่ง (position vector) ที่ลากจากจุดอ้างอิง (reference point) O ไปยังจุด A และ B ตามลำดับ อนุภาคจึงมีการเปลี่ยนตำแหน่งในทิศจาก A ไปยัง B ด้วย ขนาดเท่ากับระยะ AB หรือ  $|\Delta r|$  ในช่วงเวลา  $\Delta t$  โดยที่  $\Delta r$  คือ การขจัดซึ่งเป็นปริมาณเวกเตอร์

$$\begin{aligned}\Delta r &= r(t_2) - r(t_1) \\ \Delta t &= t_2 - t_1\end{aligned}\quad \dots(28)$$



รูปที่ 2.15 เมื่อเวลา  $t_1$  และ  $t_2$  อนุภาคอยู่ที่ตำแหน่ง A และ B ตามลำดับ โดยมี  $r(t_1)$  และ  $r(t_2)$  เป็นเวกเตอร์บอกตำแหน่งตามลำดับ แนวเส้นสัมผัสกับเส้นทาง (path) ของอนุภาคที่จุดใด แสดงทิศของ

ความเร็วบัดดล  $v = \frac{dr}{dt}$  ณ จุดนั้น

อัตราส่วนระหว่างการขจัด  $\Delta r$  กับช่วงเวลา  $\Delta t$  ก็คือการขจัดของอนุภาคต่อหน่วยเวลา และเราเรียกปริมาณนี้ว่า ความเร็วเฉลี่ย (average velocity,  $v_{av}$ ) ของอนุภาค

นั่นคือ

$$v_{av} = \frac{\Delta r}{\Delta t}\quad \dots(29)$$

ดังนั้น ความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคก็คือการขจัดของอนุภาคต่อหน่วยเวลา และความเร็วเฉลี่ยเป็นเวกเตอร์ที่มีทิศเดียวกับทิศของการขจัด มีหน่วยเป็น เมตร-วินาที<sup>-1</sup> ( $\text{ms}^{-1}$ )

ขนาดของความเร็วเฉลี่ยเขียนได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาสาระใด ๆ ของเอกสารนี้ และต้องแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี... (30) ไปใช้

$$v_{av} = |v_{av}| = \left| \frac{\Delta r}{\Delta t} \right| = \frac{|\Delta r|}{\Delta t}$$

นอกจากความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคในช่วงเวลาหนึ่งแล้ว เรายังอยากรู้ว่าอนุภาคจะเคลื่อนที่ ณ ขณะหนึ่งด้วยความเร็วเท่าใด จึงต้องพิจารณาความเร็วขณะนั้น เรียกว่า ความเร็วชั่วขณะ (instantaneous velocity) ของอนุภาค ซึ่งโดยปกติจะเรียกสั้นๆ ว่า ความเร็ว แทนด้วย  $v$

วิธีพิจารณาความเร็วชั่วขณะของอนุภาคให้ใกล้เคียงมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ทำได้โดยคำนึงถึงความหมายของความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคเป็นพื้นฐานประกอบการพิจารณา เช่น ถ้าต้องการหาความเร็วของอนุภาคในรูปที่ 2.15 ขณะเคลื่อนที่ผ่านจุด A จะต้องพิจารณาช่วงเวลาที่ยาวไปให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่ต้องไม่เท่ากับศูนย์ กล่าวคือ  $\Delta t \rightarrow 0$  แต่  $\Delta t \neq 0$

นั่นคือ ความเร็วชั่วขณะของอนุภาคย่อมาหมายถึง ความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคในขณะที่พิจารณาช่วงเวลาของการเคลื่อนที่ให้สั้นสุดเท่าที่จะทำได้คือเข้าใกล้ศูนย์แต่ไม่เท่ากับศูนย์ และเขียนในรูปของสมการคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{r(t + \Delta t) - r(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt} \quad \dots(31)$$

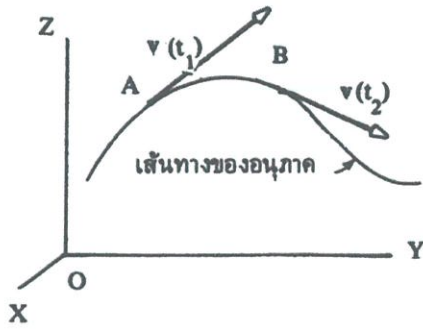
ที่ทางของ  $v$  ที่ตำแหน่ง A จะอยู่ในแนวเส้นสัมผัสกับเส้นทางของอนุภาคที่จุด A ดังแสดงในรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่าความเร็วชั่วขณะก็คืออนุพันธ์ของ  $r$  เทียบกับเวลานั่นเอง บางครั้งการเรียกความเร็วเฉยๆ ก็คือ ความเร็วชั่วขณะนั่นเอง

2.9.2 ความเร่ง ความเร็วเป็นปริมาณเวกเตอร์ ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงความเร็วเปลี่ยนแปลงอาจหมายความว่าขนาดของความเร็วเปลี่ยน หรือ ทิศของความเร็วเปลี่ยน หรือมีการเปลี่ยนทั้งขนาดและทิศ

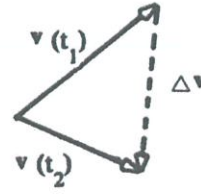
ถ้าอนุภาคเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น แสดงว่าอนุภาคมีความเร่ง (acceleration) แต่ถ้าความเร็วของอนุภาคลดลง อนุภาคก็มีความหน่วง (retardation or deceleration) ในบางกรณี เช่น อนุภาคเคลื่อนที่เป็นวงกลม อนุภาคอาจจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่ แต่ทิศของความเร็วเปลี่ยนไปเรื่อยๆ ในกรณีนี้อนุภาคก็มีความเร่งเช่นกัน

พึงสังเกตว่า ควรใช้ความเร่งเป็นเวกเตอร์ และอัตราเร่งซึ่งเป็นขนาดของความเร่งเป็นสเกลาร์ โดยเปรียบเทียบกับความเร็วซึ่งเป็นเวกเตอร์ และอัตราเร็วซึ่งเป็นขนาดของความเร็วเป็นสเกลาร์ แต่นิยมโดยทั่วไปใช้ความเร่งทั้งในความหมายที่เป็นเวกเตอร์และสเกลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.16 (ก) เมื่อเวลา  $t_1$  อนุภาคอยู่ที่ A มีความเร็ว  $v(t_1)$  และมีความเร็ว  $v(t_2)$  ที่ B เมื่อเวลา  $t_2$

(ข) การเปลี่ยนความเร็วในช่วงเวลา  $\Delta t = t_2 - t_1$  ความเร็วของอนุภาคเปลี่ยนไปเป็น

$$\Delta v = v(t_2) - v(t_1)$$

สมมติขณะเวลา  $t_1$  อนุภาคอยู่ที่จุด A และมีความเร็ว  $v(t_1)$  เมื่ออยู่ที่จุด B ณ เวลา  $t_2$  มีความเร็ว  $v(t_2)$  ดังรูปที่ 2.16 (ก) ดังนั้น ในช่วงเวลา  $\Delta t = t_2 - t_1$  ความเร็วของอนุภาคเปลี่ยนไปเป็น  $\Delta v = v(t_2) - v(t_1)$  ดังรูป 2.16 (ข)

อัตราการเปลี่ยนความเร็วของอนุภาคในช่วงเวลานี้ คือ ความเร่งเฉลี่ย  $a_{av}$

$$a_{av} = \frac{v(t_2) - v(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad \dots(32)$$

$a_{av}$  เป็นเวกเตอร์ที่มีทิศเดียวกันกับทิศของ  $\Delta v$  และมีขนาดเท่ากับ  $\frac{\Delta v}{\Delta t}$  และมีหน่วยเป็น เมตร·วินาที<sup>-2</sup> ( $\text{ms}^{-2}$ )

ถ้า  $a_{av}$  แทนขนาดของความเร่งเฉลี่ยหรืออัตราเร่งเฉลี่ย

$$a_{av} = |a_{av}| = \left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| \quad \dots(33)$$

ในทำนองเดียวกันกับที่เราพิจารณาความเร็ว बदดล เราจะหาความเร่ง बदดล ณ ตำแหน่งใดๆ ของอนุภาคได้เช่นกัน กล่าวคือ คิดจากความเร็วเฉลี่ยในช่วงเวลาสั้นที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แม้มิเป็น ศูนย์ นั่นคือ  $\Delta t \rightarrow 0$  ให้  $a$  คือความเร่ง बदดลของอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี... (34) ไปใช้

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}$$

จาก  $v = \frac{dr}{dt}$

จะได้

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dr}{dt} \right) = \frac{d^2 r}{dt^2} \quad \dots(35)$$

2.9.3 การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ถ้าความเร็วของอนุภาคคงที่ ความเร็วขณะใดขณะหนึ่งของอนุภาคที่เวลาใดๆ ก็จะมีค่าเท่ากับความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคภายในช่วงเวลาทั้งหมด นั่นคือ  $v = v_{av}$  ดังนั้นจะได้สมการที่ใช้สำหรับการคำนวณในสถานการณ์นี้ คือ

$$v = v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad \dots(36)$$

ใ้ที่นึกถึงการกระจัด  $\Delta x = x_f - x_i$  จะเห็นว่า  $v = \frac{x_f - x_i}{\Delta t}$  หรือ

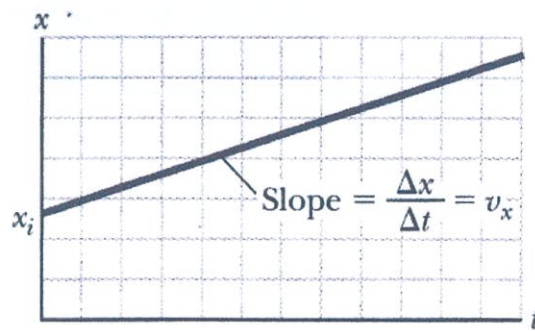
$$x_f = x_i + v\Delta t \quad \dots(37)$$

สมการข้างต้นนี้บ่งบอกว่าตำแหน่งของอนุภาคนั้นได้มาจากผลรวมของตำแหน่งที่จุดเริ่มต้นของอนุภาค  $x_i$  ที่เวลา  $t = 0$  บวกกับการกระจัด  $v\Delta t$  ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป  $\Delta t$  . ในทางปฏิบัติมักจะเลือกเวลาที่จุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ให้เป็น  $t_i = 0$  และให้เวลาสิ้นสุดของการเคลื่อนที่ที่เป็น  $t_f = t$  ดังนั้น สมการจะได้เป็น

$$x_f = x_i + v\Delta t \quad (\text{สำหรับกรณีที่ } v \text{ คงที่}) \quad \dots(38)$$

กราฟของอนุภาคที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ มีความชันของกราฟแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่นั้นมีลักษณะคงที่และมีขนาดเท่ากับขนาดของความเร็ว จากสมการ  $x_f = x_i + v\Delta t$  (สำหรับกรณีที่  $v$  คงที่) จะเป็นสมการเส้นตรง ดังรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลาของอนุภาคที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ โดยความชันเส้นกราฟคือค่าของความเร็วคงที่

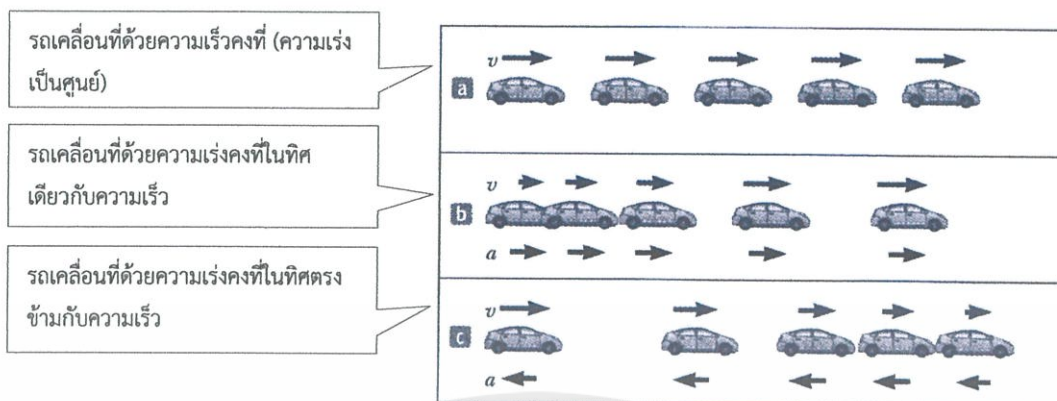
สามารถอธิบายความเกี่ยวข้องของความเร็วและความเร่งให้เข้าใจง่ายๆ ได้ดังรูปที่ 2.15 อธิบายได้ดังนี้

รูปที่ 2.18a ภาพรถยนต์ระยะทางเท่ากันในแต่ละช่วงเวลาเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ทราบว่ารถยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งความเร็วนี้มีค่าเป็นบวก และมีความเร่งเป็นศูนย์

รูปที่ 2.18b ภาพรถยนต์ห่างจากกันมากขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการกระจัดของรถยนต์ระหว่างตำแหน่งที่ติดกันเพิ่มขึ้นตามเวลา ลักษณะนี้แสดงว่ารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่มีค่าเป็นบวก และ ความเร่งที่มีค่าเป็นบวก โดยความเร็วและความเร่งมีทิศเดียวกัน รถยนต์จะเคลื่อนที่เร็วขึ้นเรื่อยๆ

รูปที่ 2.18c ภาพรถยนต์เข้าใกล้กันมากขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการกระจัดของรถยนต์ระหว่างตำแหน่งที่ติดกันลดลงตามเวลา ลักษณะนี้แสดงว่ารถเคลื่อนที่ด้วยความเร่งที่ติดลบ จากภาพนี้จะเห็นว่าความเร็วและความเร่งไม่ได้อยู่ในทิศเดียวกัน โดยรถยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่มีค่าเป็นบวก แต่มีความเร่งที่มีค่าเป็นลบ การที่ความเร็วและความเร่งอยู่ในทิศที่ตรงข้ามกันจะทำให้วัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ลดลงเรื่อยๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 ความเกี่ยวข้องของความเร็วและความเร่ง อธิบายโดยภาพการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงของรถยนต์บนถนน ความเร็วในแต่ละช่วงเวลาแสดงโดยลูกศรด้านบนตัวรถ และความเร่งซึ่งมีค่าคงที่แสดงโดยลูกศรที่อยู่ด้านล่างตัวรถ

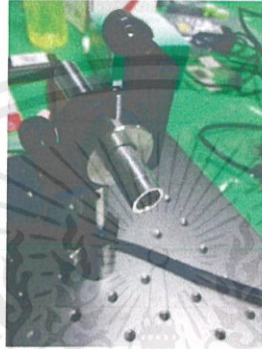
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

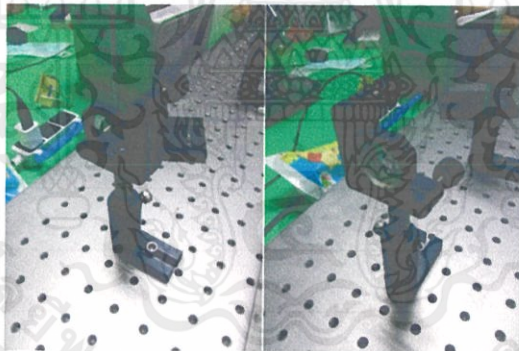
# ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

#### 1. เลเซอร์ไดโอด (Laser diode)



#### 2. เลนส์ (Optical lens)

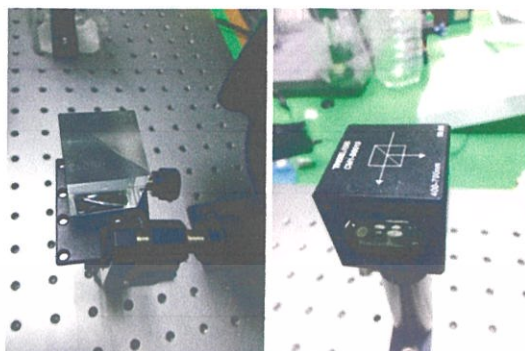


#### 3. แผ่นกรองแสง (Filter)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาหรือข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. อุปกรณ์แยกลำแสง (beam splitter)



#### 5. กระจกเงา (Mirror)



#### 6. ที่จับหลอดทดลองแบบไม้หนีบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7. กล้องซีซีดี (CCD camera)



## 8. ช่องของไหลที่ทำจากพลาสติก



## 9. เม็ดพลาสติก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 10. น้ำกลั่น



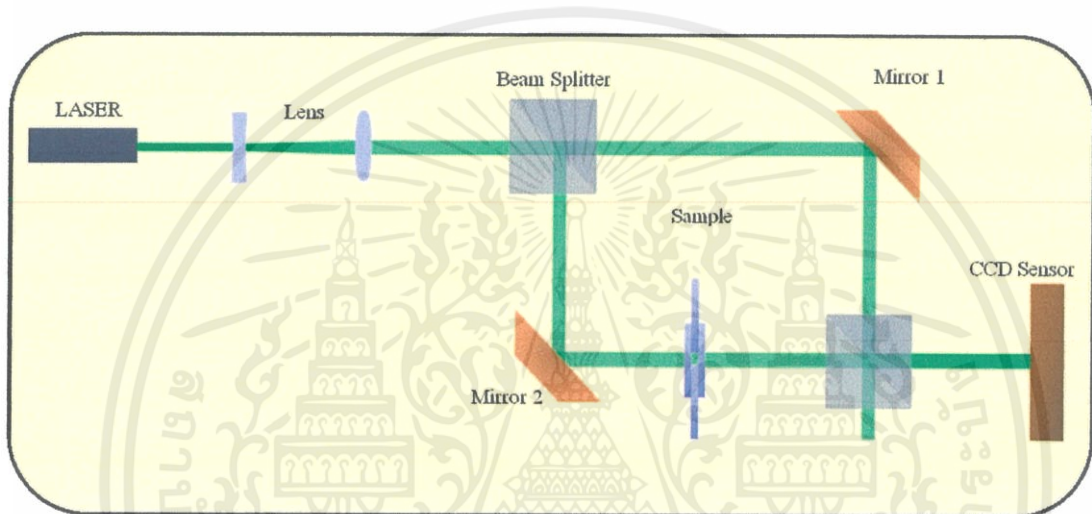
## 11. เกลือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 วิธีทำการทดลอง

1. จัดชุดอุปกรณ์การทดลองดิจิทัลโฮโลกราฟี ซึ่งประกอบไปด้วยเลเซอร์ไดโอด, ท่อตัดแปลงจากกลาสสไลด์, กระจกเงา, ฟิลเตอร์กรองแสง, บีมสปลิตเตอร์ และกล้องซีซีดี จัดแสงจากเลเซอร์ไดโอดให้ขนานด้วยเลนส์เว้าและเลนส์นูน จากนั้นผ่านบีมสปลิตเตอร์ทำการแยกแสงออกเป็น 2 ลำ คือ objective beam และ reference beam objective beam จะไปทะลุผ่านท่อตัดแปลงจากกลาสสไลด์ แล้วไปกระทบและแทรกสอดกับ reference beam ที่กล้องซีซีดี



รูปที่ 3.1 แสดงการติดตั้งระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีแบบ Mach Zehnder

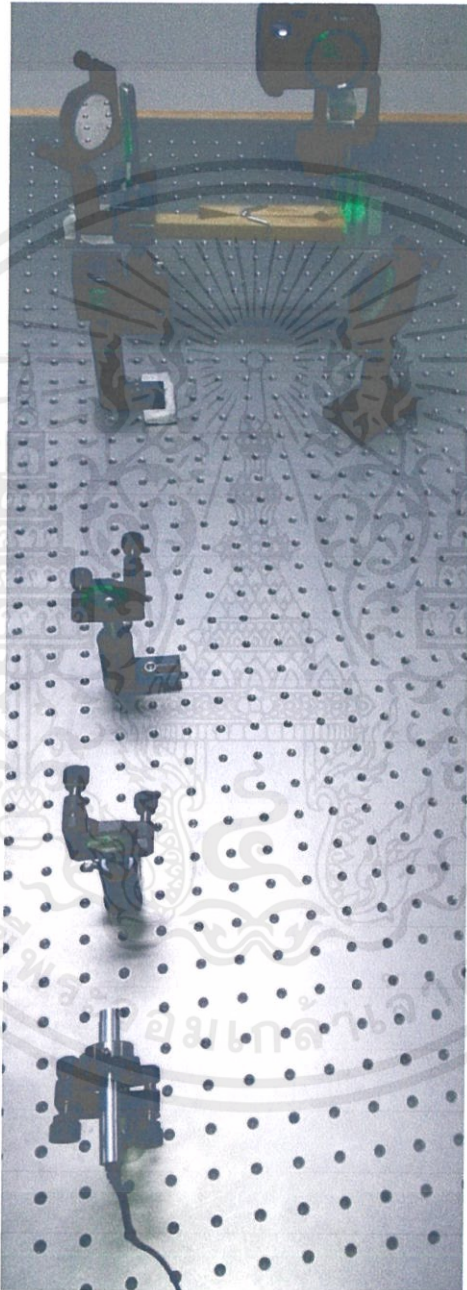
2. ใส่น้ำกลั่นให้เต็มท่อตัดแปลงจากกลาสสไลด์ เปลี่ยนเม็ดพลาสติกลงไปแทนท่อตัดแปลงจากกลาสสไลด์ แล้วทำการถ่ายภาพ
3. เปลี่ยนจากน้ำกลั่นเป็นน้ำอุ่น น้ำเย็น น้ำเกลือ แล้วทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 ตามลำดับ
4. เปลี่ยนขนาดของท่อตัดแปลงจากกลาสสไลด์ แล้วทำการทดลองตั้งขั้นตอนที่ 2 และ 3 ตามลำดับ
5. นำภาพที่ได้จากเงื่อนไขการทดลองต่างๆไปทำการ reconstruction โดยการใช้โปรแกรม MATLAB
6. วิเคราะห์ภาพที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลงานวิจัยและอภิปรายผล

#### 4.1 ระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีที่ได้เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุขนาดเล็ก ดังรูป



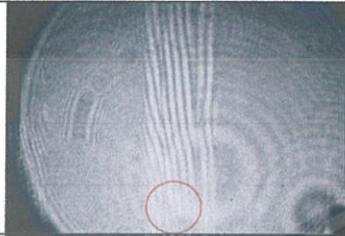
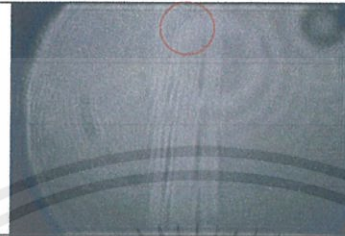
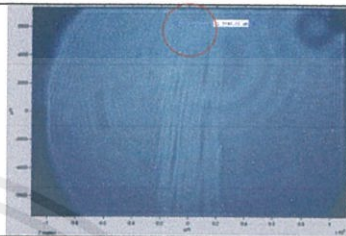


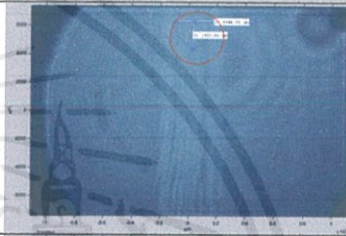








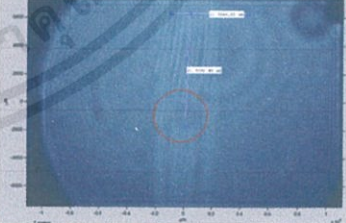
รูปที่ 4.1 ระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีที่ได้จากการติดตั้งแบบ Mach Zehnder

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

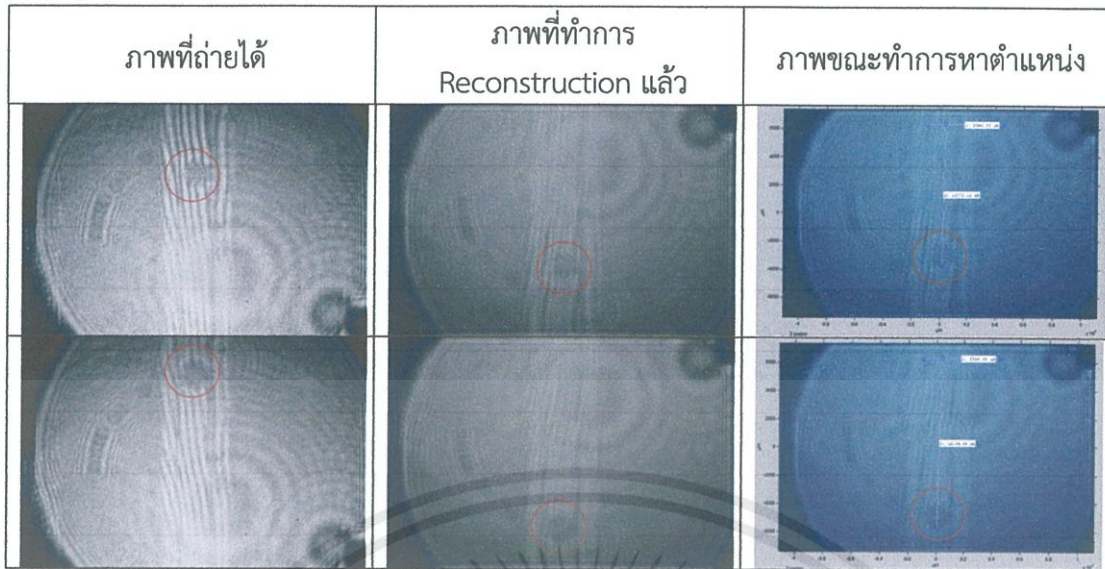
4.2 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำกลั่นในท่อขนาด 2×2 mm. ที่อุณหภูมิต่างๆ

4.2.1 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำกลั่นในท่อขนาด 2×2 mm. ที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 4.1 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำกลั่นในท่อขนาด 2×2 mm. ที่อุณหภูมิห้อง

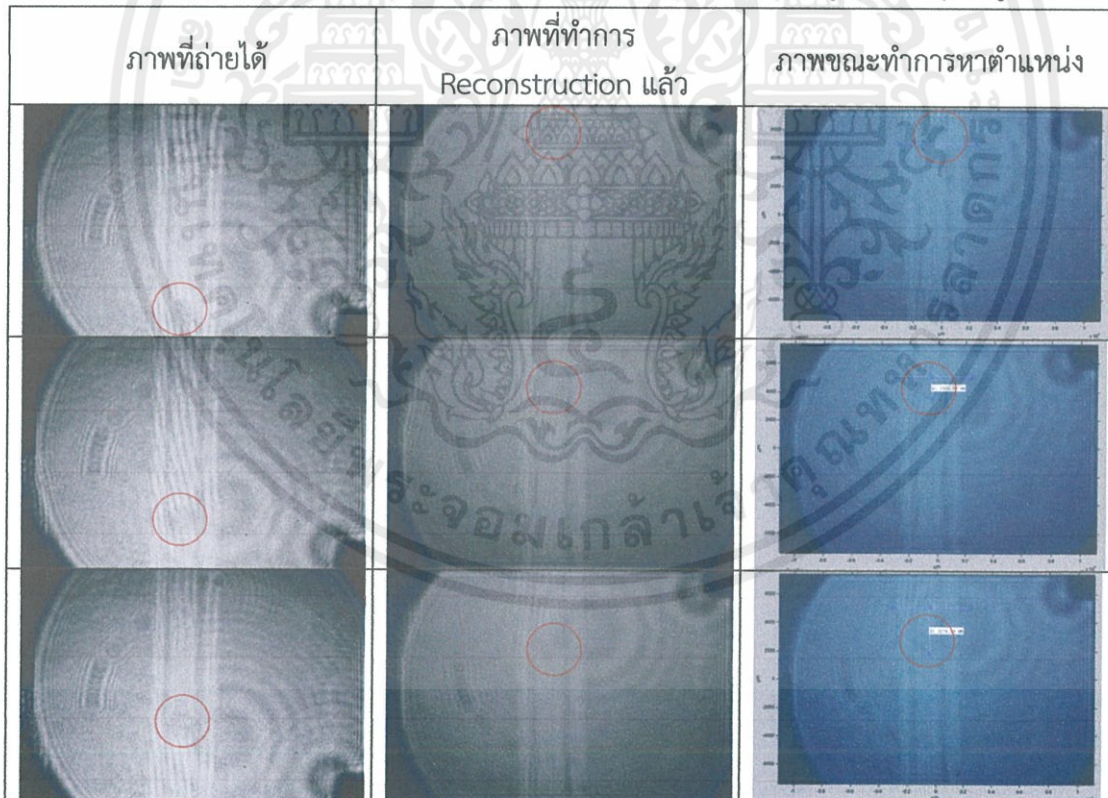
ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



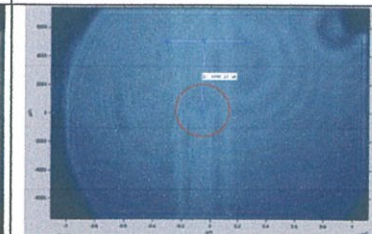

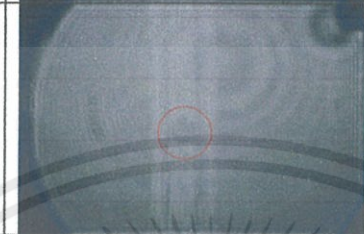
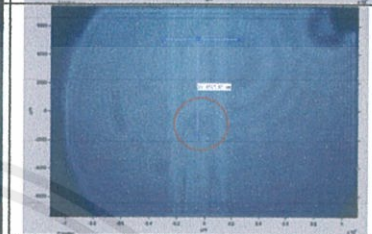

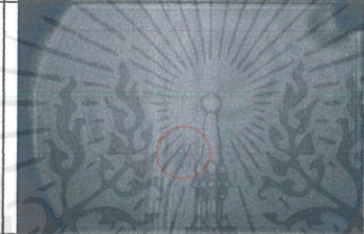
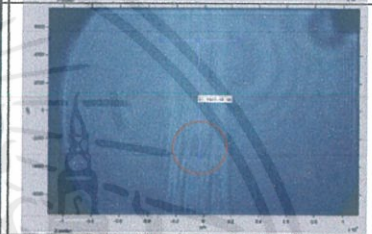


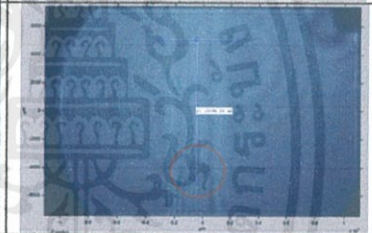


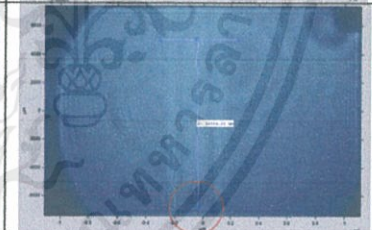


4.2.2 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำกลั่นในท่อขนาด 2×2 mm. ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 4.2 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำกลั่นในท่อขนาด 2×2 mm. ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำกลั่นในท่อขนาด  $2 \times 2$  mm. ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 4.3 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำกลั่นในท่อขนาด  $2 \times 2$  mm. ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง


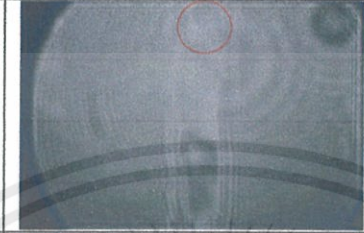
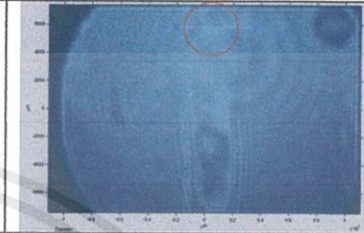











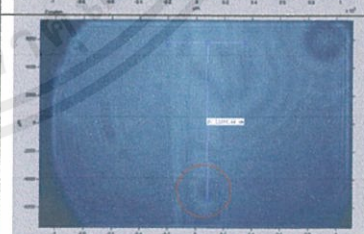
ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำกลั่นในท่อขนาด 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิต่างๆ

4.3.1 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำกลั่นในท่อขนาด 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิห้อง


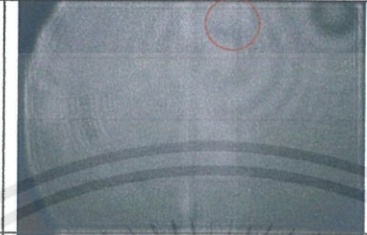
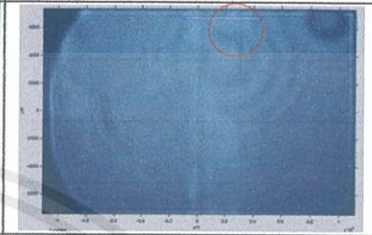


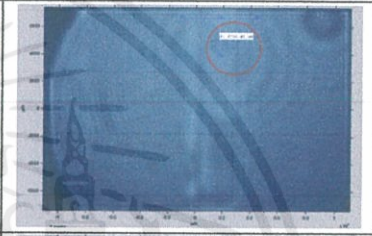





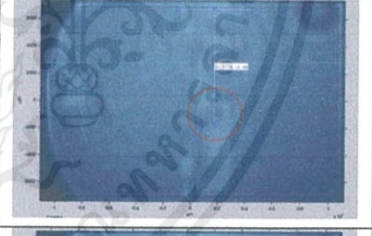
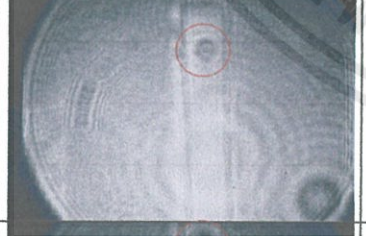
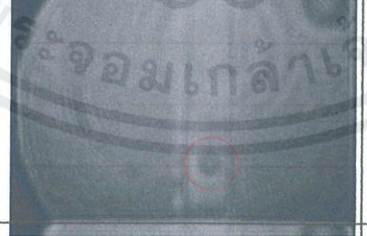
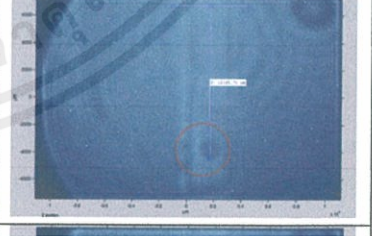


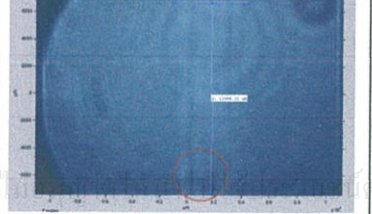
ตารางที่ 4.4 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำกลั่นในท่อขนาด 2.0×2.5 mm. ที่อุณหภูมิห้อง

ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำกลั่นในท่อขนาด 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 4.5 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำกลั่นในท่อขนาด 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพและการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำกลั่นในท่อขนาด 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 4.6 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำกลั่นในท่อขนาด 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง



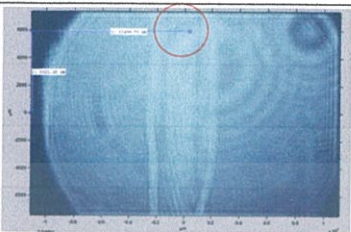


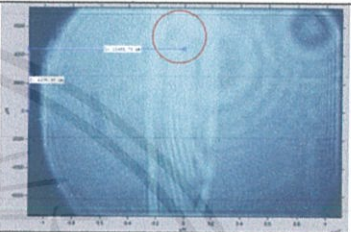





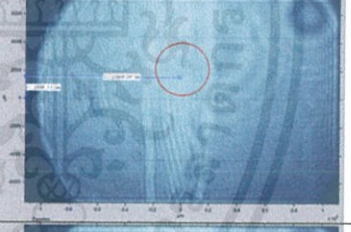








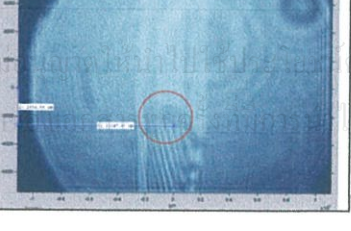
ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง

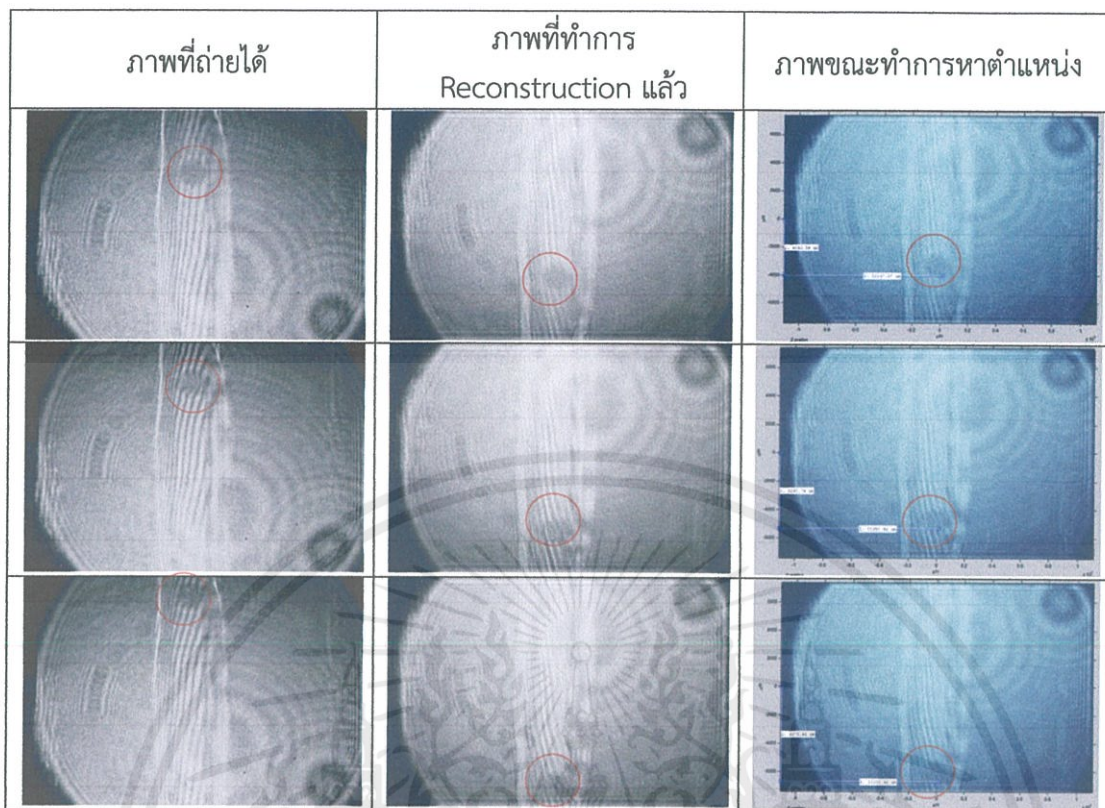
4.4 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 1.239 mol/L ในท่อขนาด 2×2 mm.

4.4.1 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 1.239 mol/L ในท่อขนาด 2×2 mm. ที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

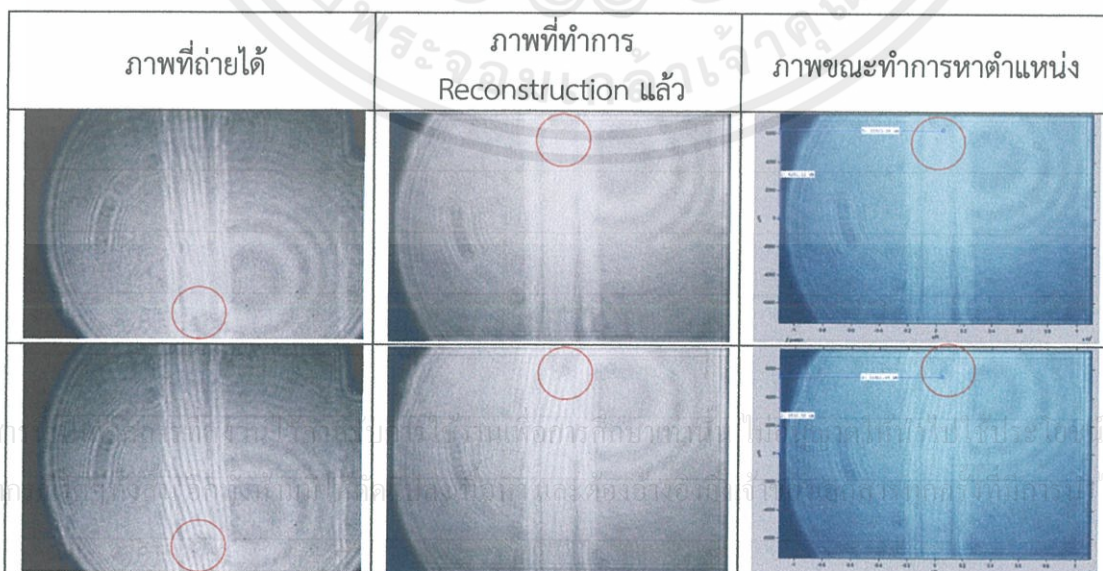
ตารางที่ 4.7 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 1.239 mol/L ในท่อขนาด 2x2 mm. ที่อุณหภูมิห้อง

ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		
		



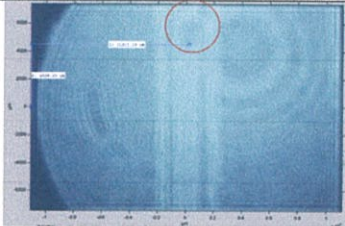

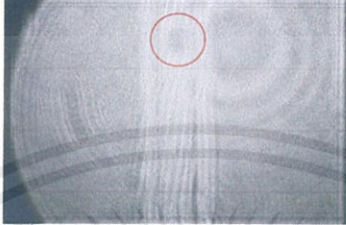
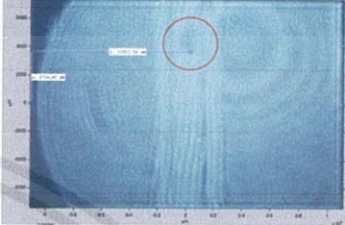

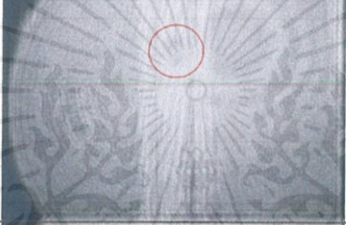
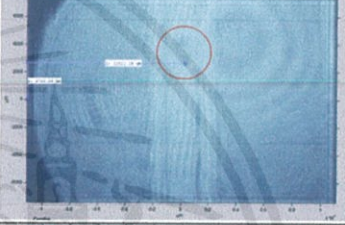


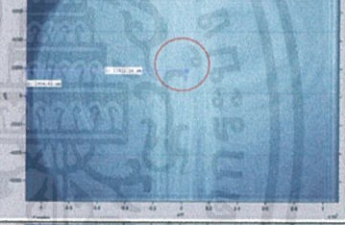





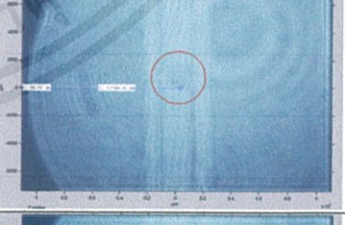


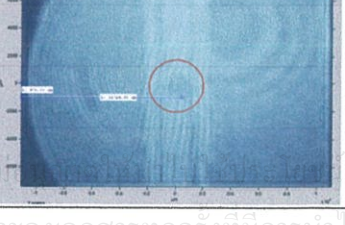


4.4.2 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 1.239 mol/L ในท่อขนาด 2×2 mm. ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 4.8 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 1.239 mol/L ในท่อขนาด 2×2 mm. ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง


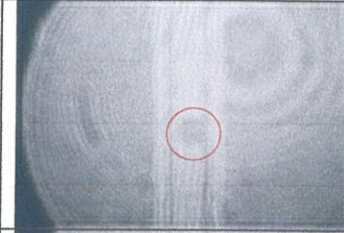
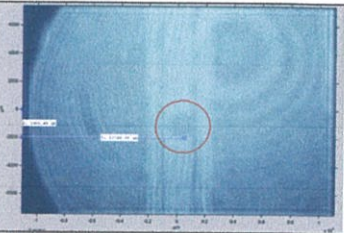

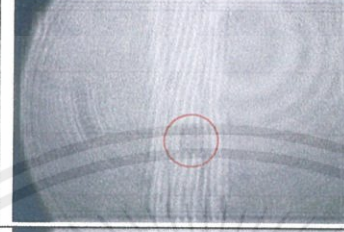
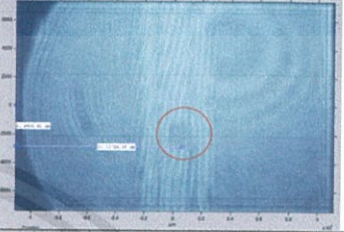


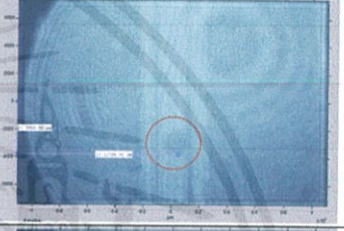
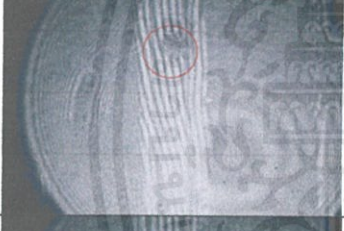










เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่น ๆ ได้

ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		
		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย



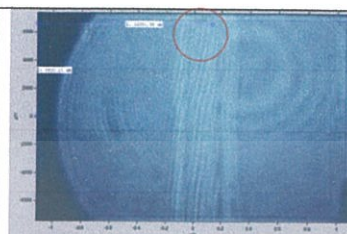
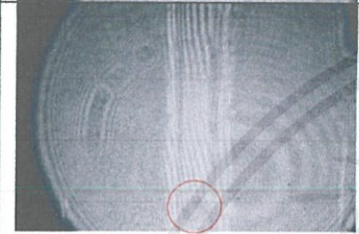
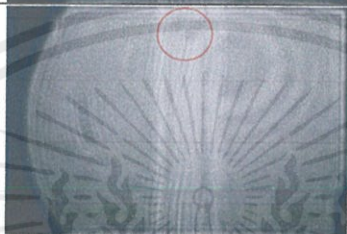
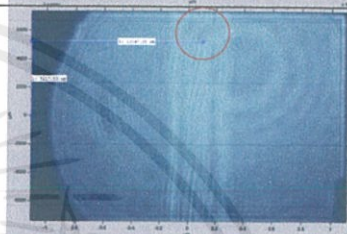


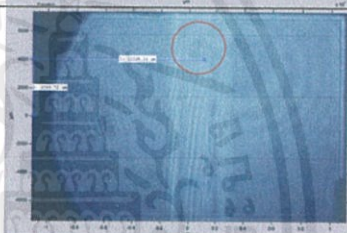





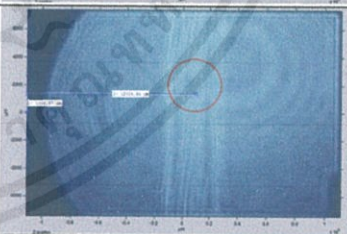
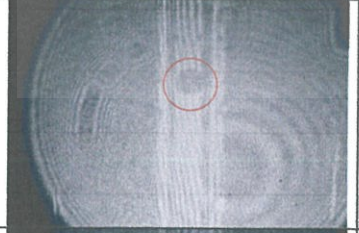

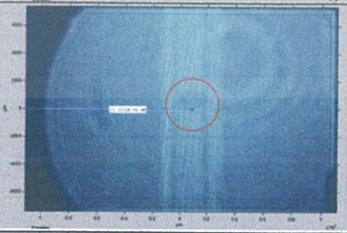


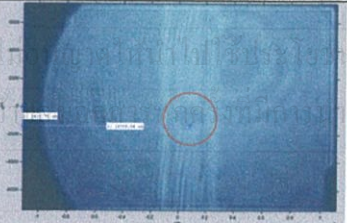
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

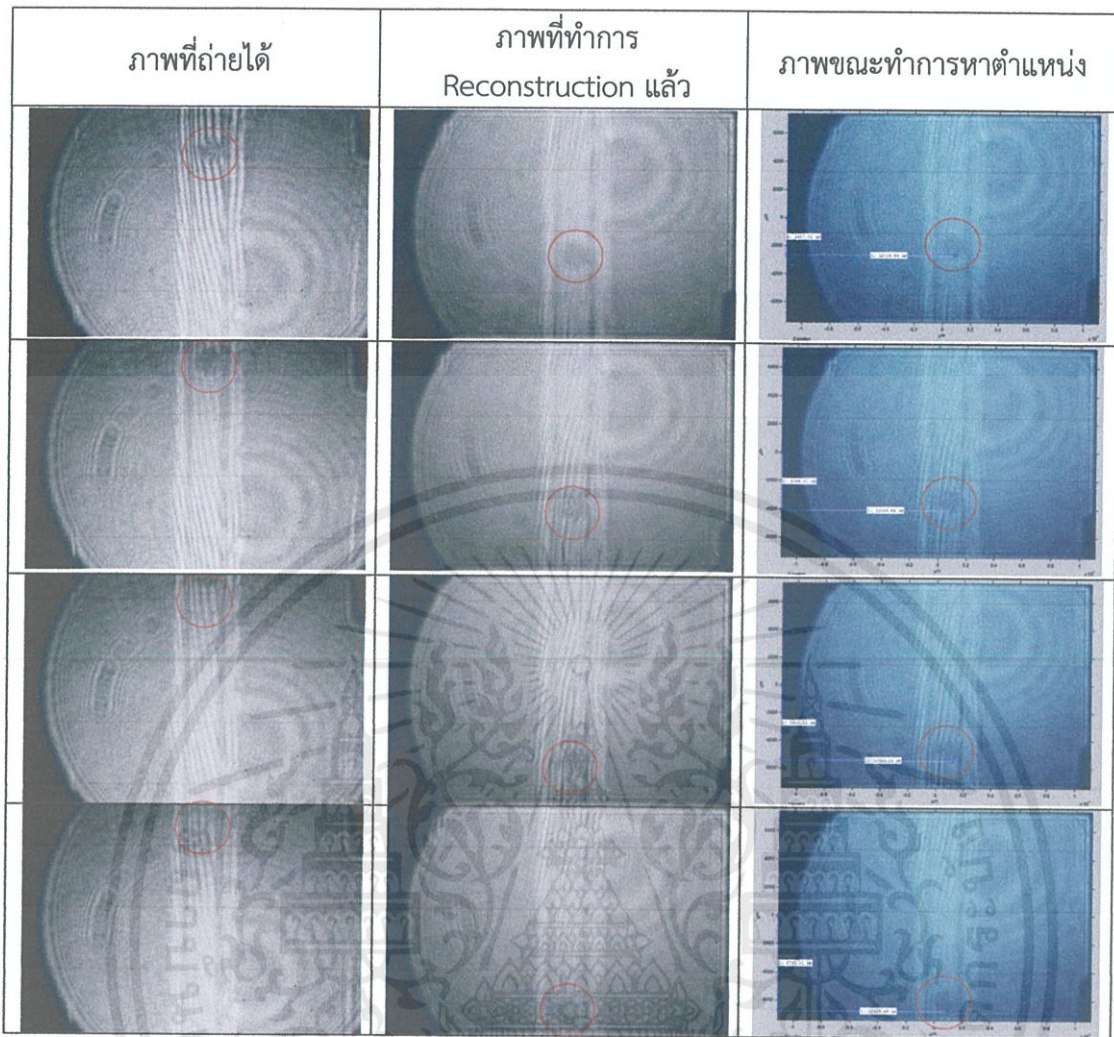
ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		

4.5 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 2.397 mol/L ในที่ขนาด 2×2 mm.

เอกสาร 4.5.1 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 2.397 mol/L ในที่ขนาด 2×2 mm. งานการดำ  
ไม่ว่าที่อุณหภูมิห้อง อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 2.397 mol/L ในท่อขนาด 2×2 mm. ที่อุณหภูมิห้อง


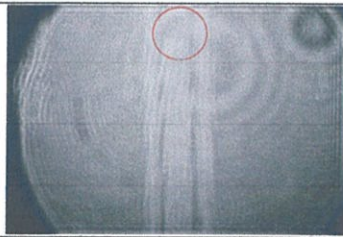
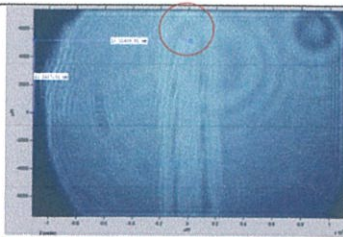

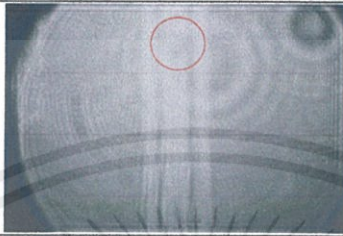
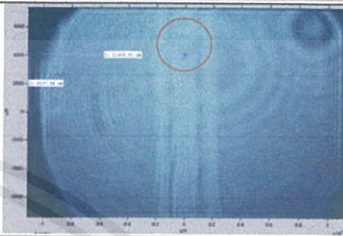

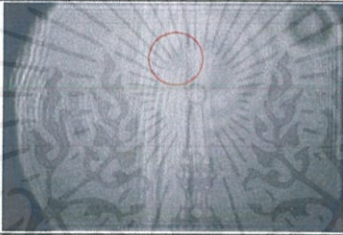
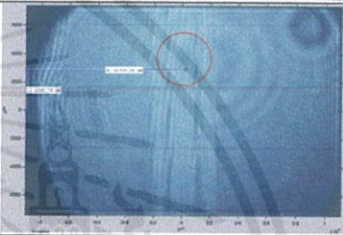


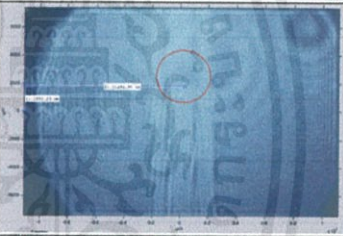


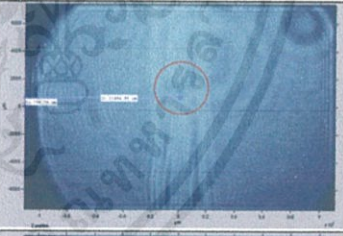


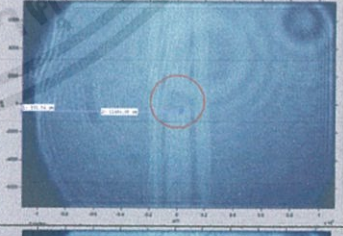


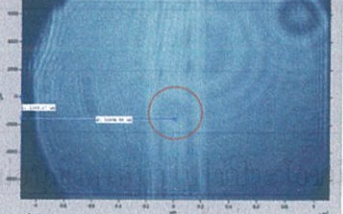
ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		
		



4.5.2 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 2.397 mol/L ในท่อขนาด 2x2 mm. ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 4.10 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 2.397 mol/L ในท่อขนาด 2x2 mm. ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง



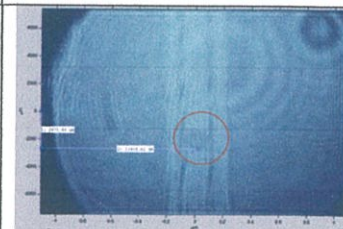

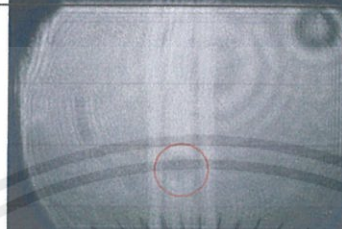
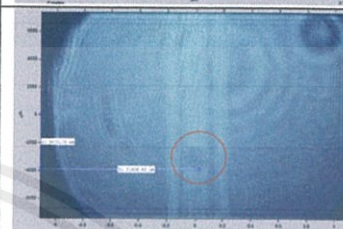


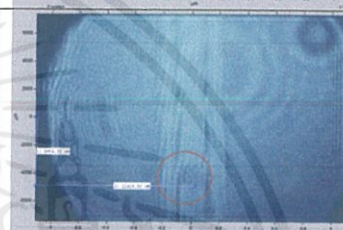








ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		
		

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของ บริษัท เทคโนโลยีการป้องกันข้อมูล จำกัด การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากบริษัทฯ ถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ออกทั้งหมด เหตุผลแบบงอนงาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

ด้านการค้า

ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		


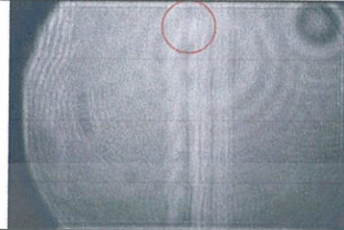
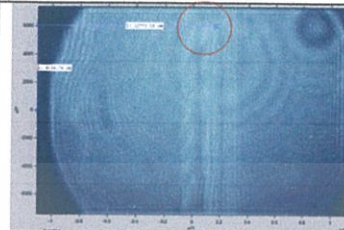
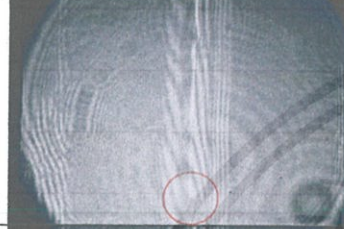
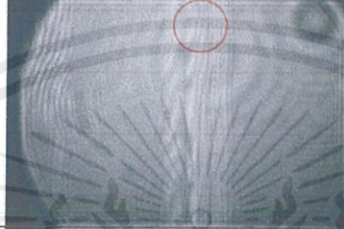
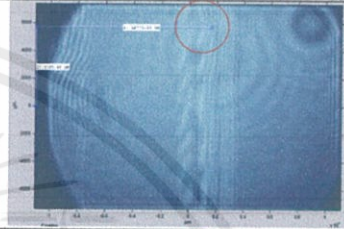


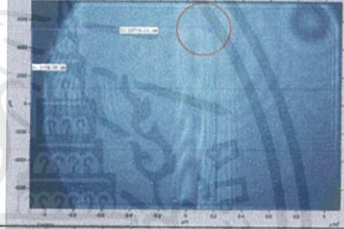


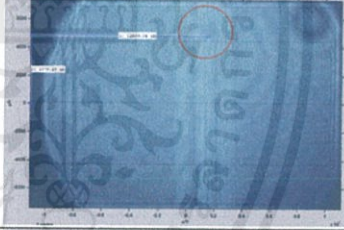


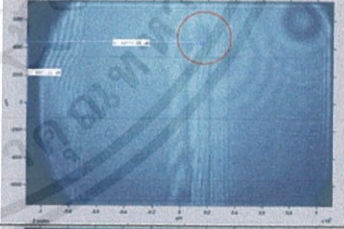





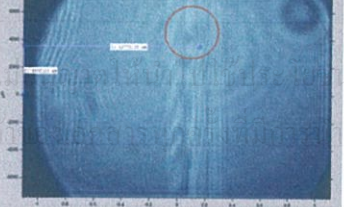
4.6 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 4.502 mol/L ในท่อขนาด 2×2 mm.

4.6.1 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 4.502 mol/L ในท่อขนาด 2×2 mm.


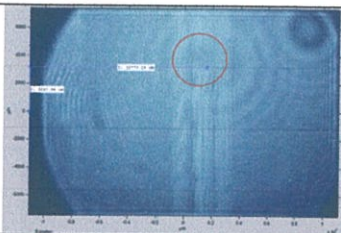


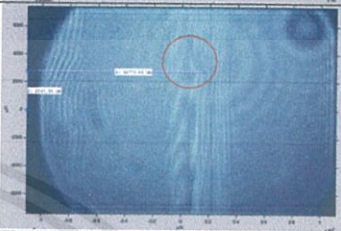
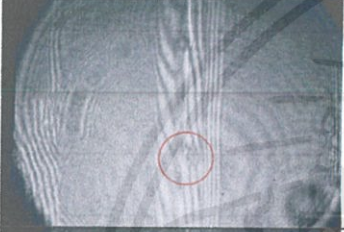
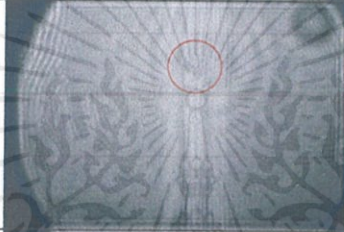
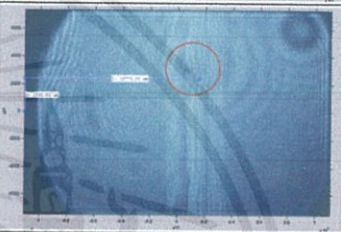

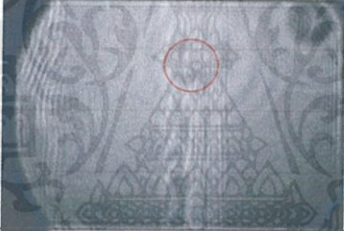
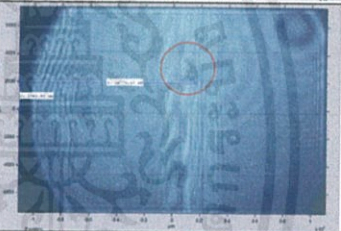





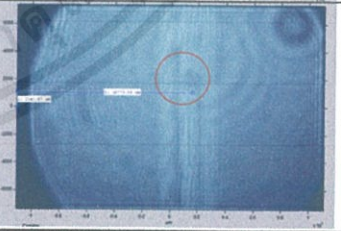
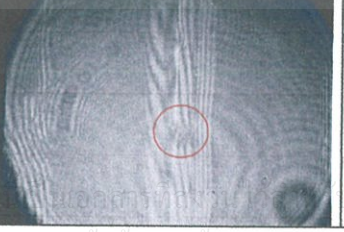

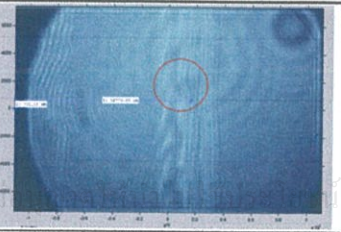
ที่อุณหภูมิต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 4.502 mol/L ในท่อขนาด 2x2 mm. ที่อุณหภูมิห้อง


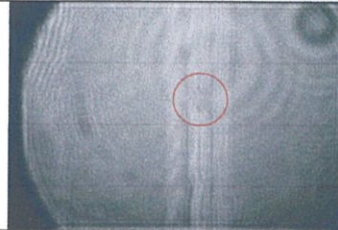
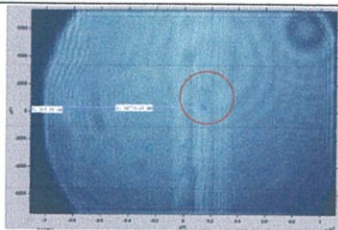

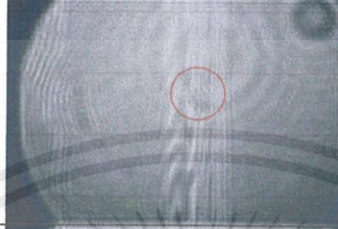
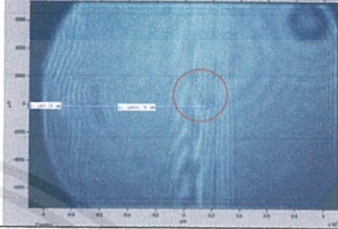

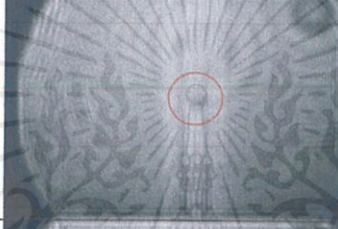









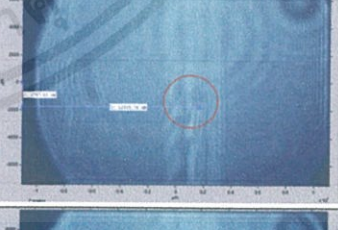


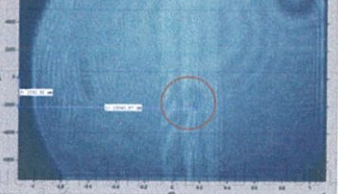
ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาค่าแทน
		
		
		
		
		
		
		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ในการค้า

ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		
		


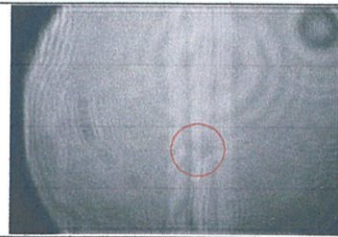
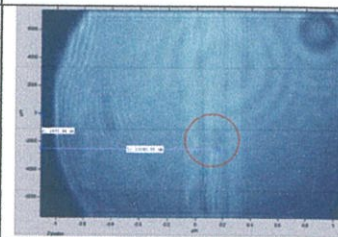
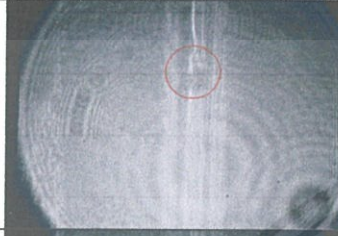
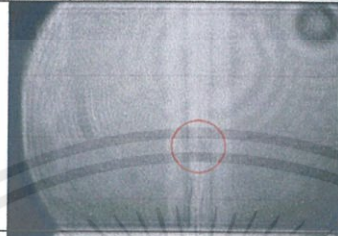
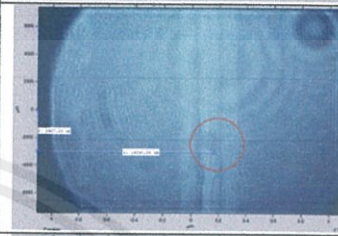
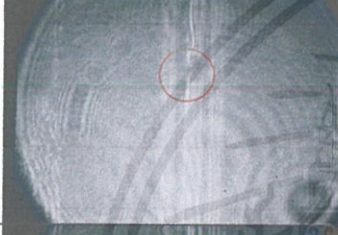

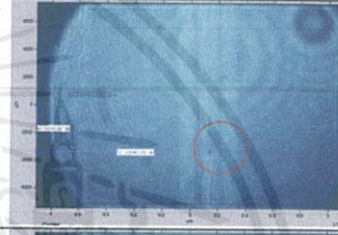






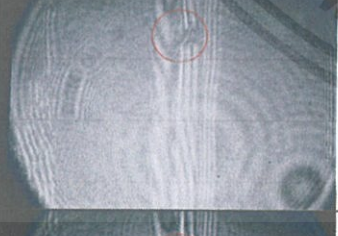

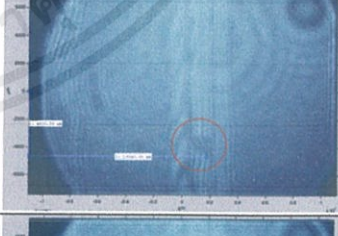


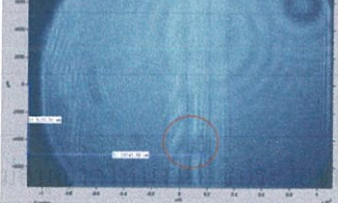
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		
		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า

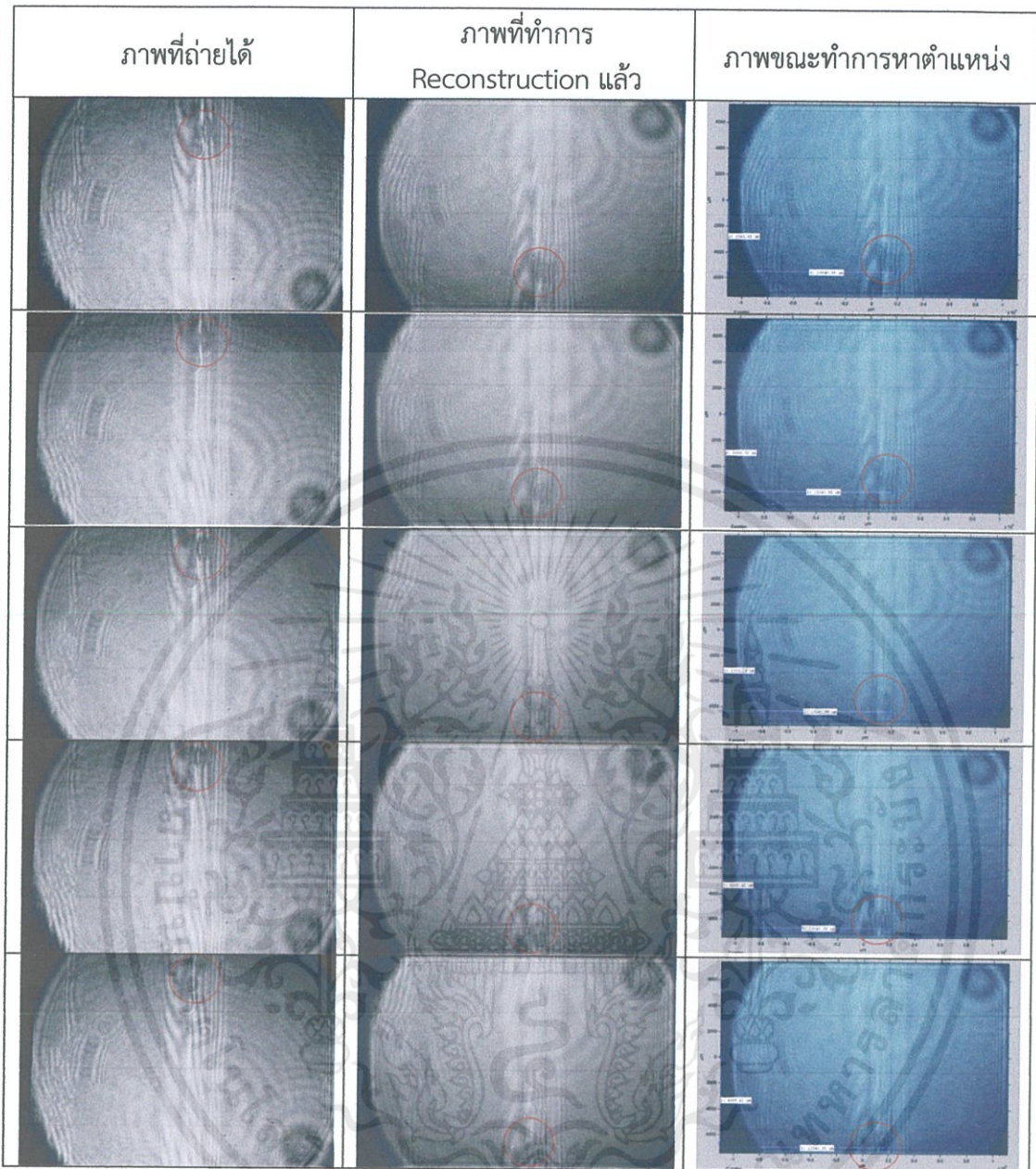
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		
		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์

สำนักงานการค้า


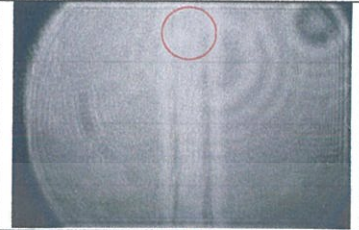
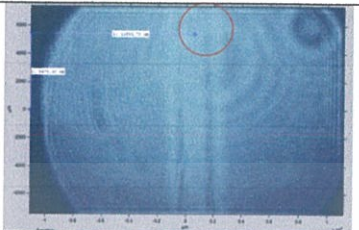

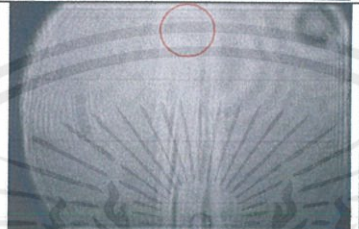
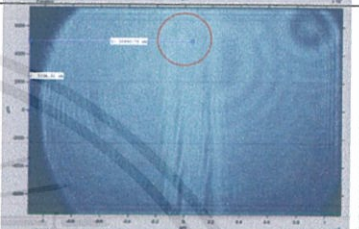


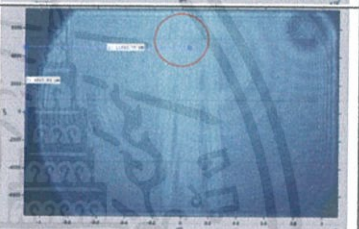


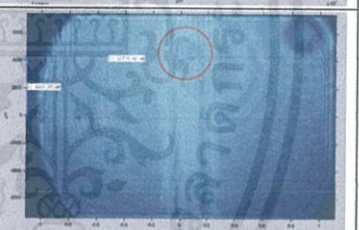


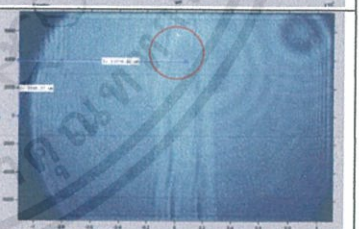


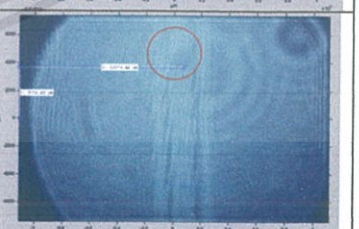

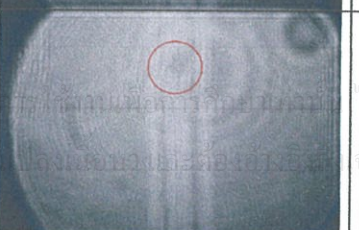
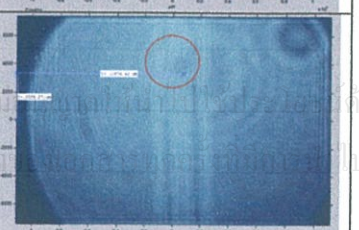
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้


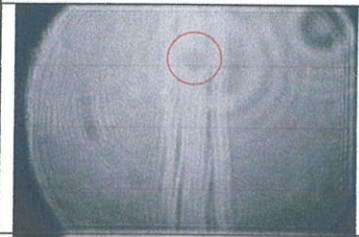
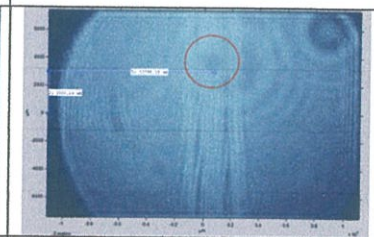
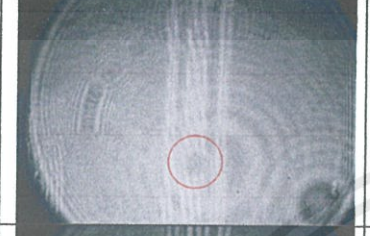
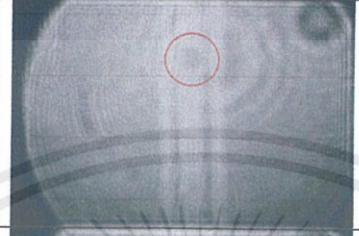
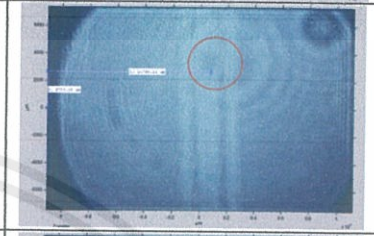

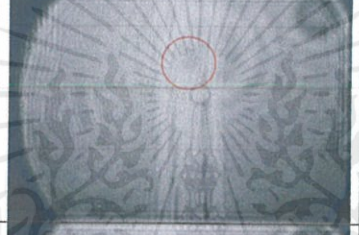







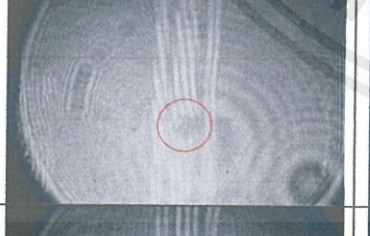

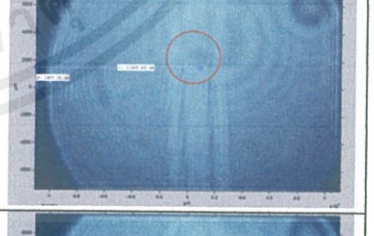


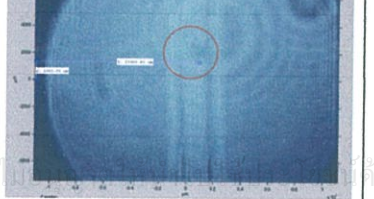


4.6.2 ผลการถ่ายภาพเมื่อดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 4.502 mol/L ในที่ขนาด 2×2 mm. ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


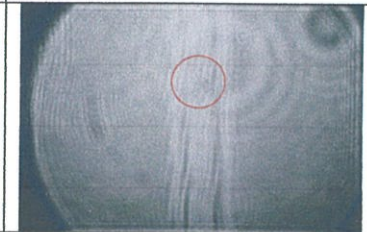
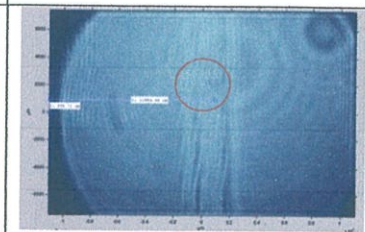

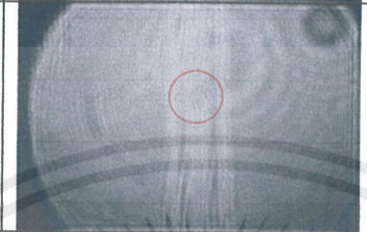
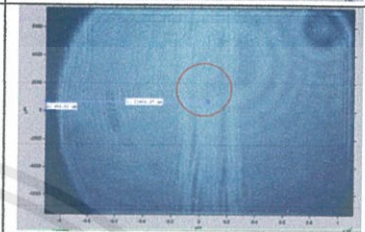


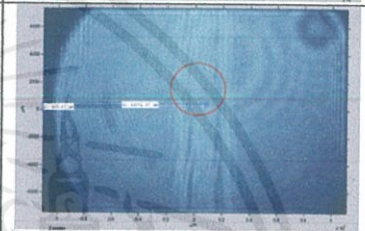


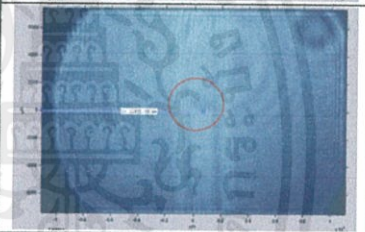


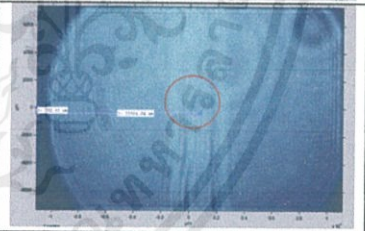


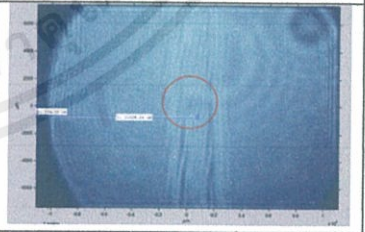

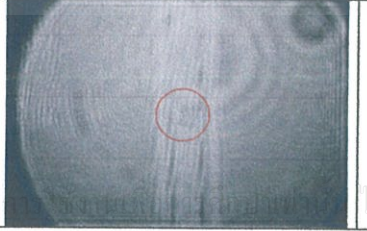
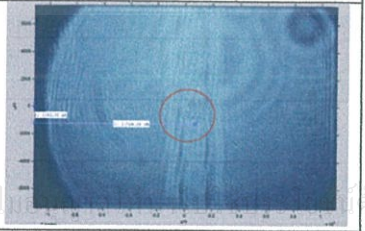
ตารางที่ 4.12 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 4.502 mol/L ในท่อขนาด 2x2 mm. ที่ อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		
		

ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		
		


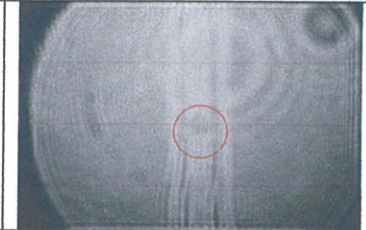
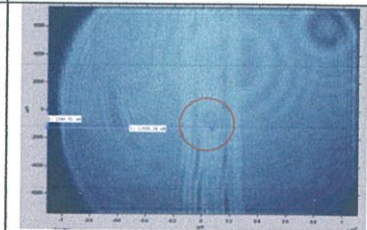

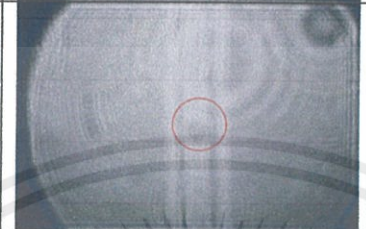
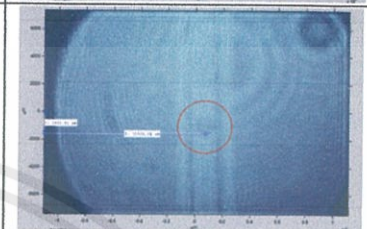













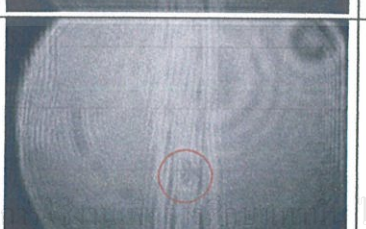
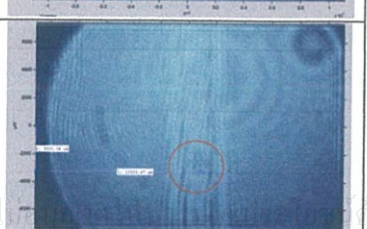
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการดำเนินงานด้านงานวิจัยและงานบริการวิชาการแก่สังคม การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาค่าตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		
		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า


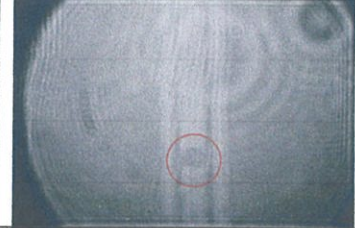
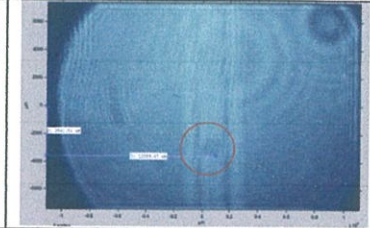

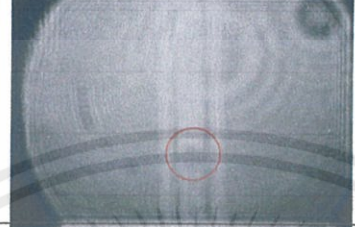
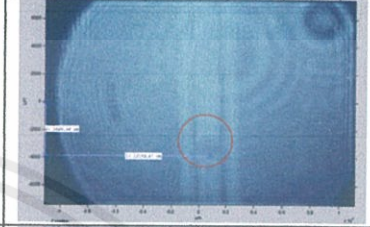








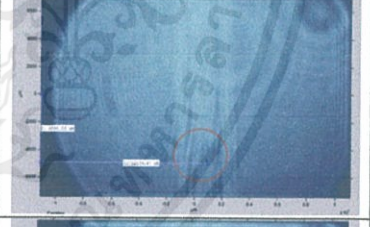





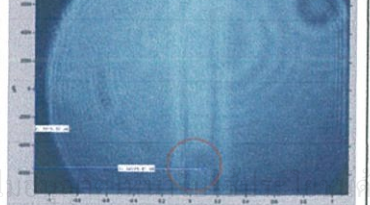
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		
		

เอกสารประกอบการสัมมนา

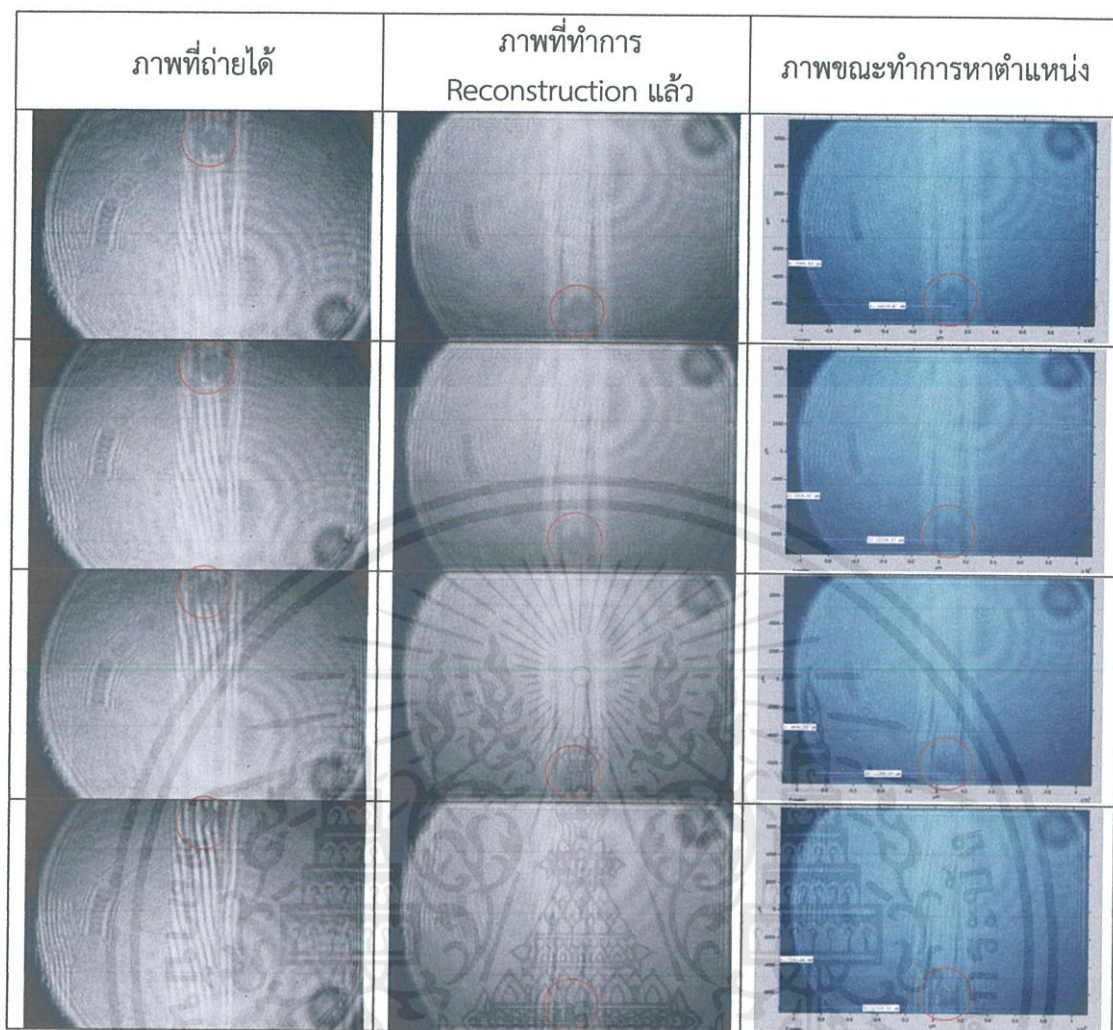
งานการตั้ง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		
		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของกรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทย การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


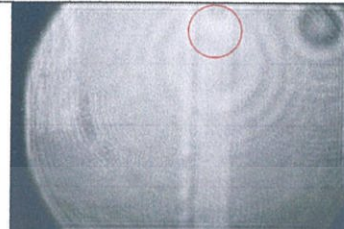
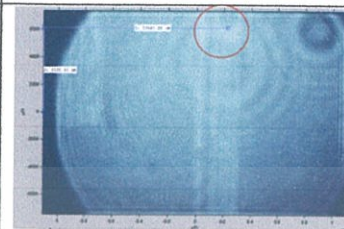
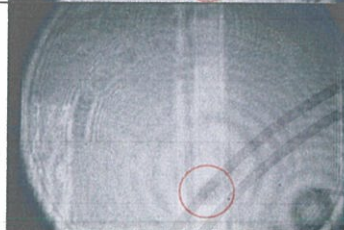

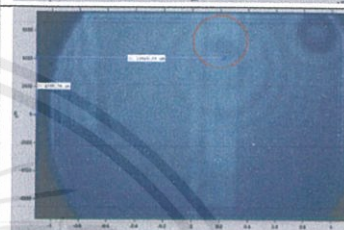











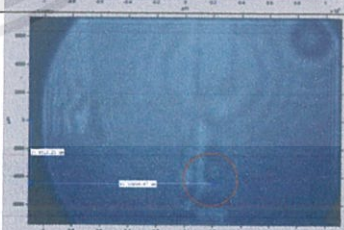


4.7 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 1.239 mol/L ในท่อขนาด 2.0×2.5 mm.

4.7.1 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 1.239 mol/L ในท่อขนาด 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


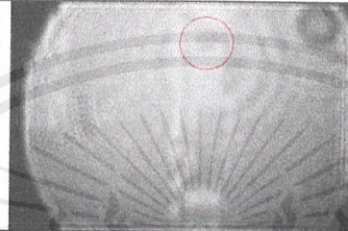
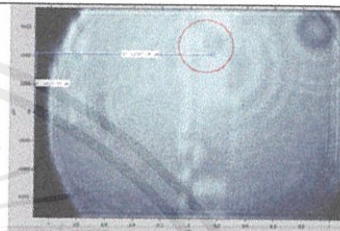














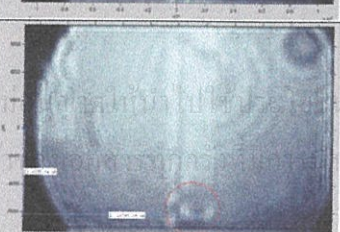
ตารางที่ 4.13 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 1.239 mol/L ในท่อขนาด 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิห้อง

ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาค่าหนึ่ง
		
		
		
		
		
		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.2 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 1.239 mol/L ในท่อขนาด 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง


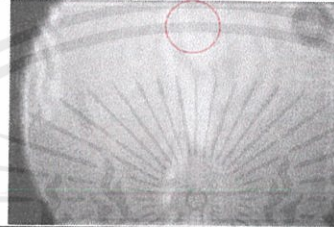
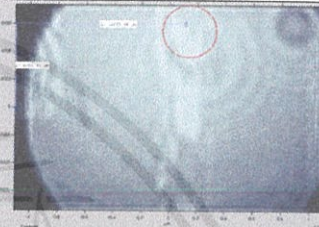





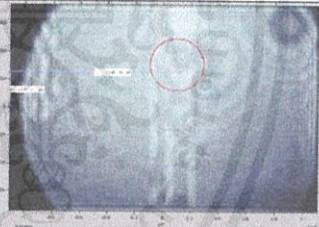


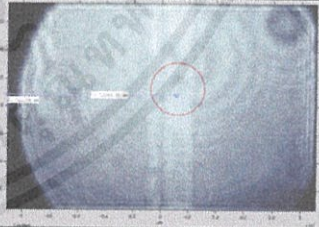



ตารางที่ 4.14 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 1.239 mol/L ในท่อขนาด 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		

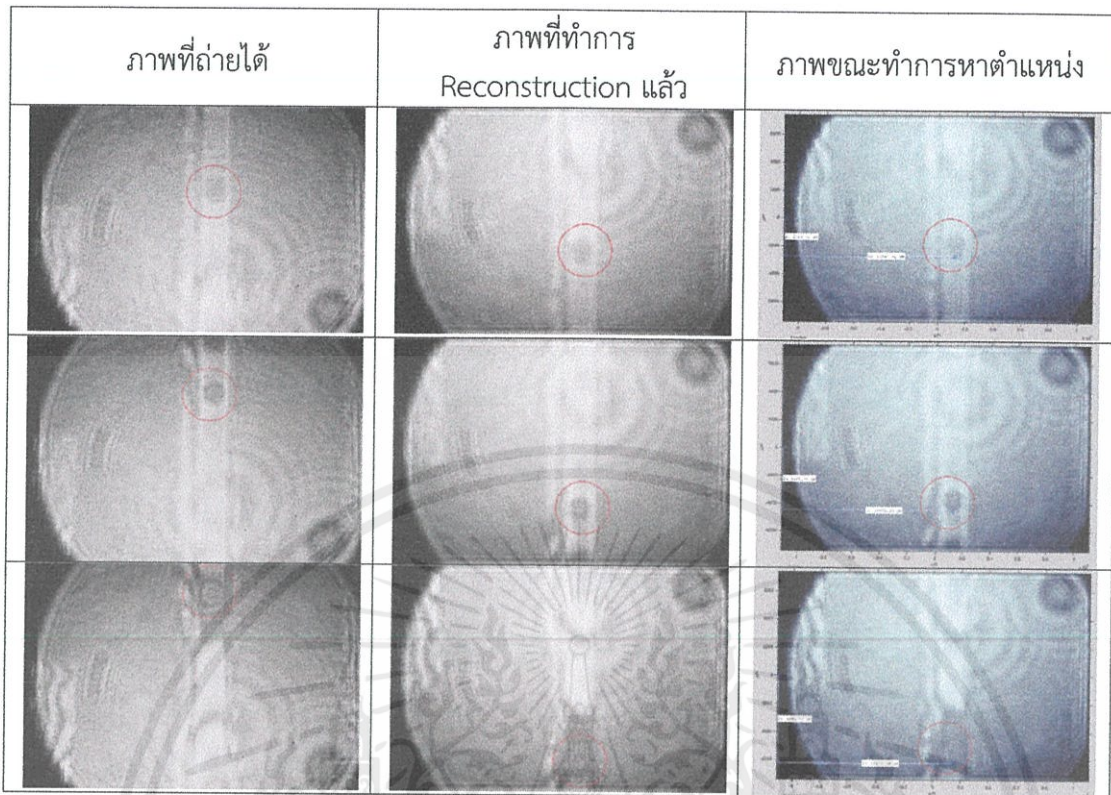
4.8 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 2.397 mol/L ในท่อขนาด 2.5×2.0 mm.

4.8.1 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 2.397 mol/L ในท่อขนาด 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 4.15 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 2.397 mol/L ในท่อขนาด 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิห้อง

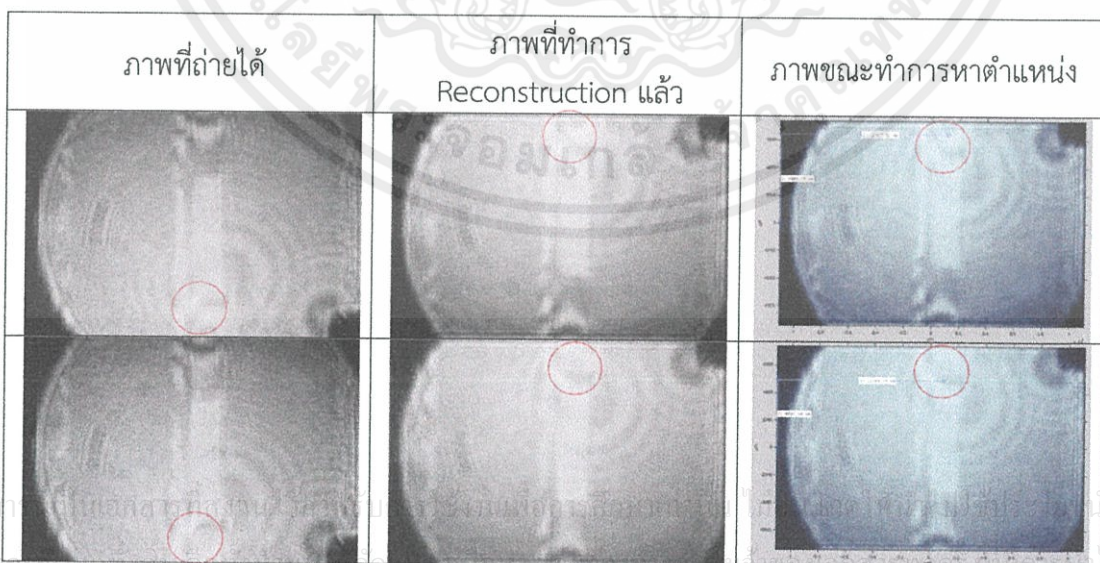
ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		


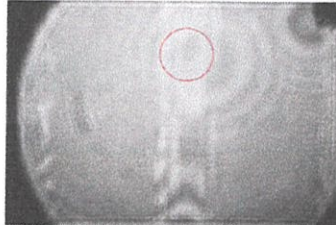
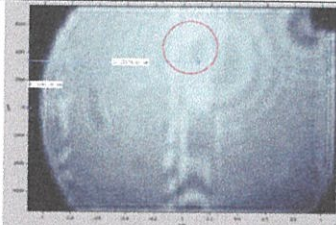

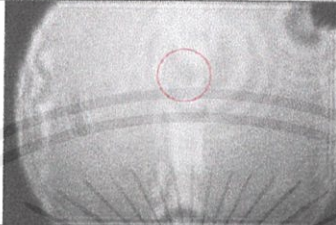


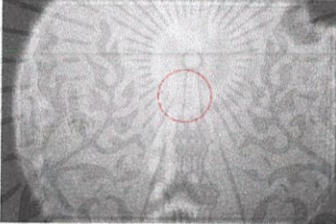
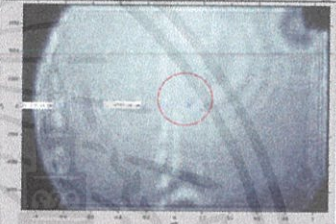



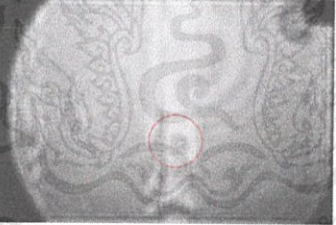
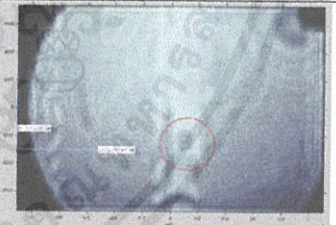


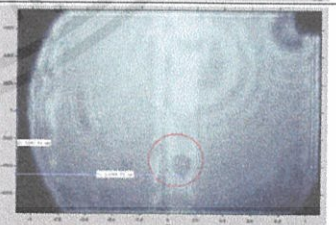
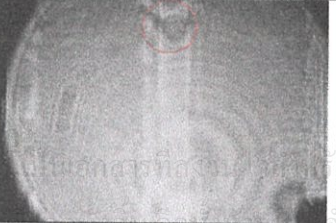

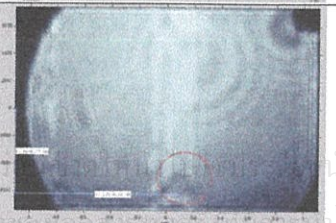
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.8.2 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 2.397 mol/L ในท่อขนาด  $2.5 \times 2.0$  mm. ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 4.16 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 2.397 mol/L ในท่อขนาด  $2.5 \times 2.0$  mm. ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง


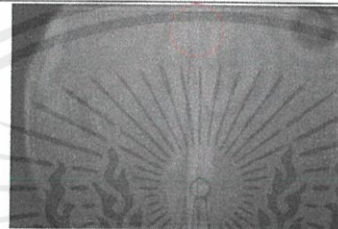
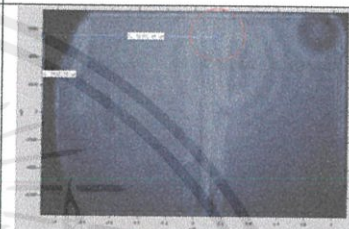


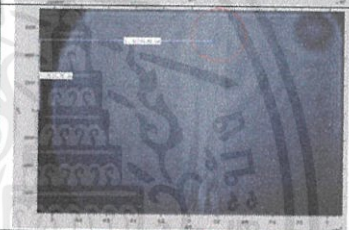


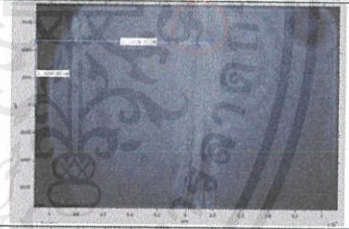


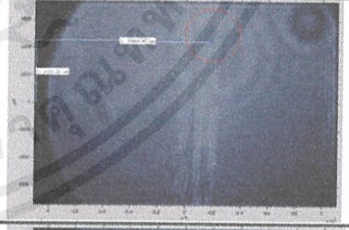


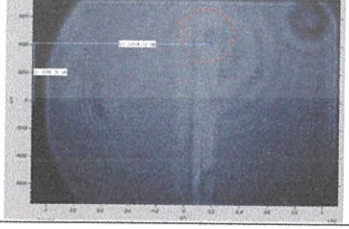


ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		
		



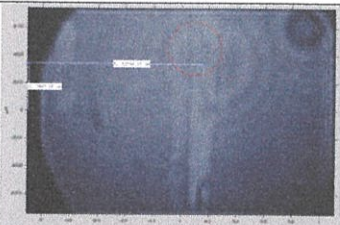

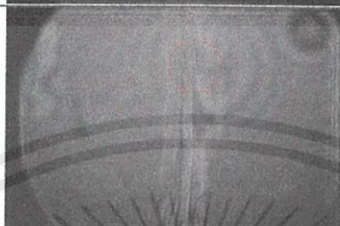
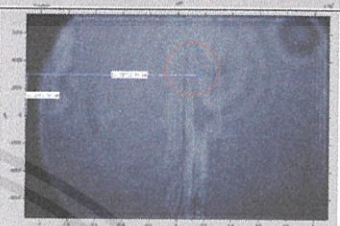
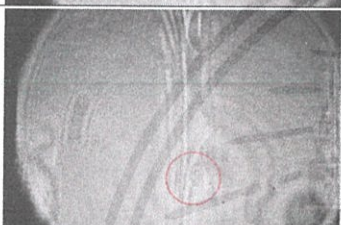












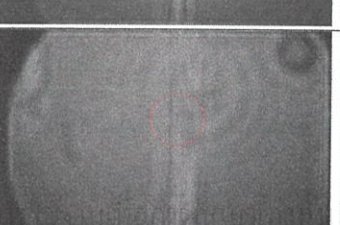

4.9 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 4.502 mol/L ในท่อขนาด 2.5×2.0 mm.

4.9.1 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 4.502 mol/L ในท่อขนาด 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิต่ำ


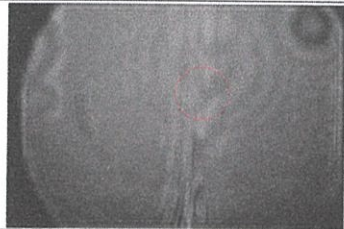
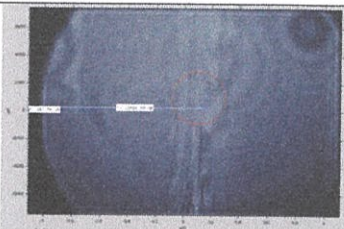

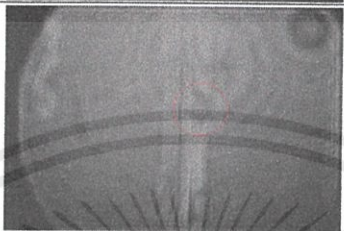
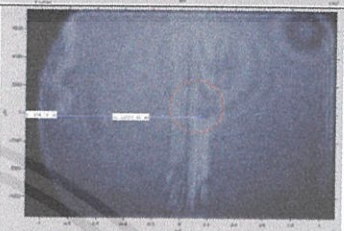
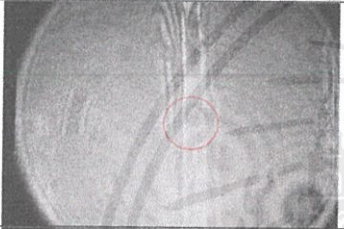

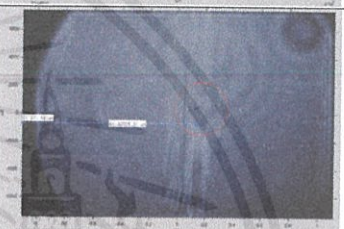


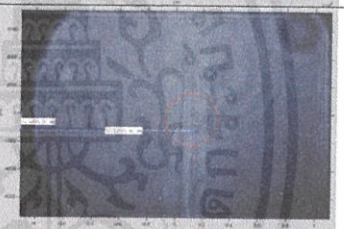


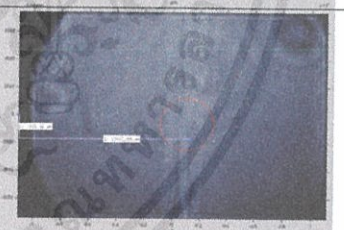


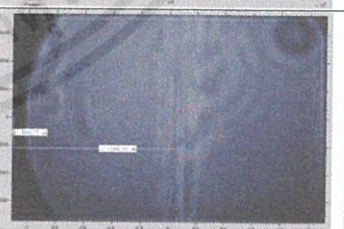



ตารางที่ 4.17 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 4.502 mol/L ในท่อขนาด 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิต่ำ

ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		
		


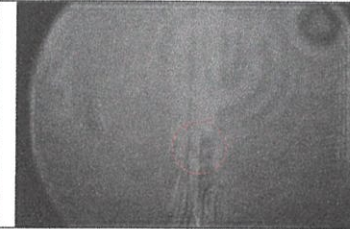
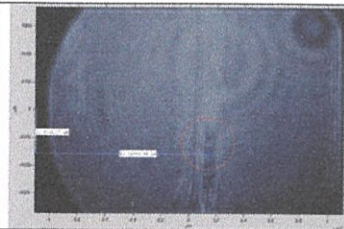

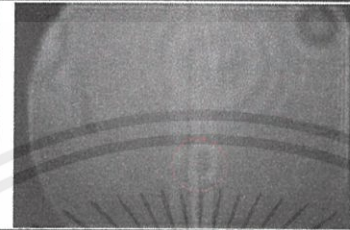
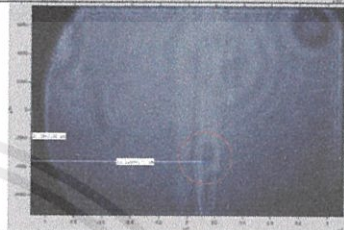
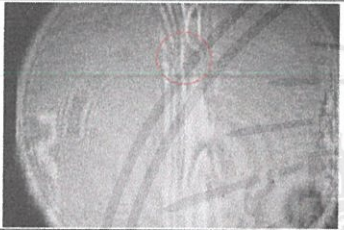

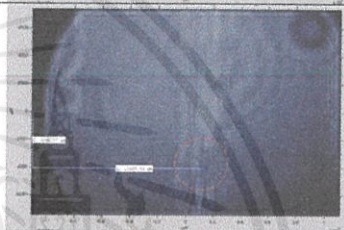





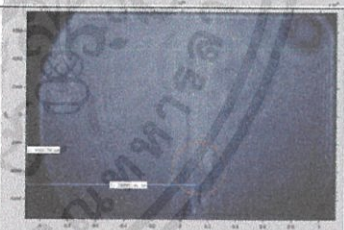


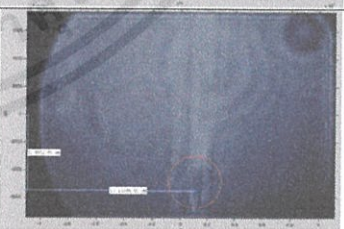


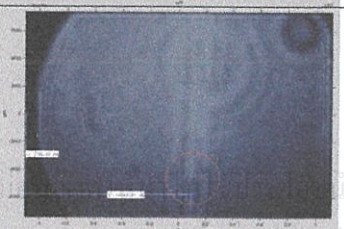
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		
		

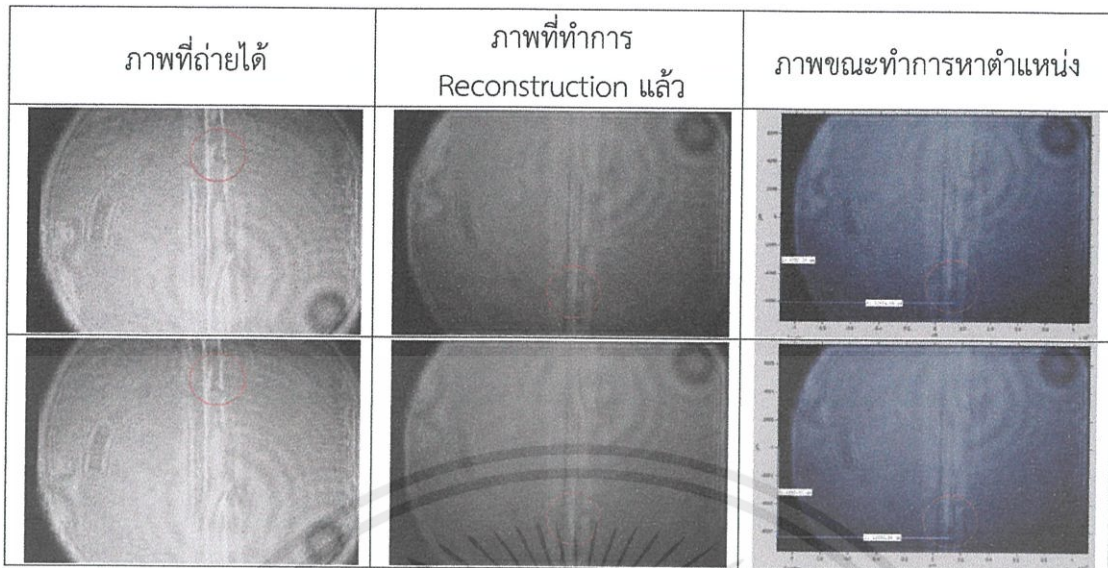
เอกสารนี้เป็นเอกสารของงานวิจัย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ออกทางนามของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถนำ

ไปใช้ในการค้า

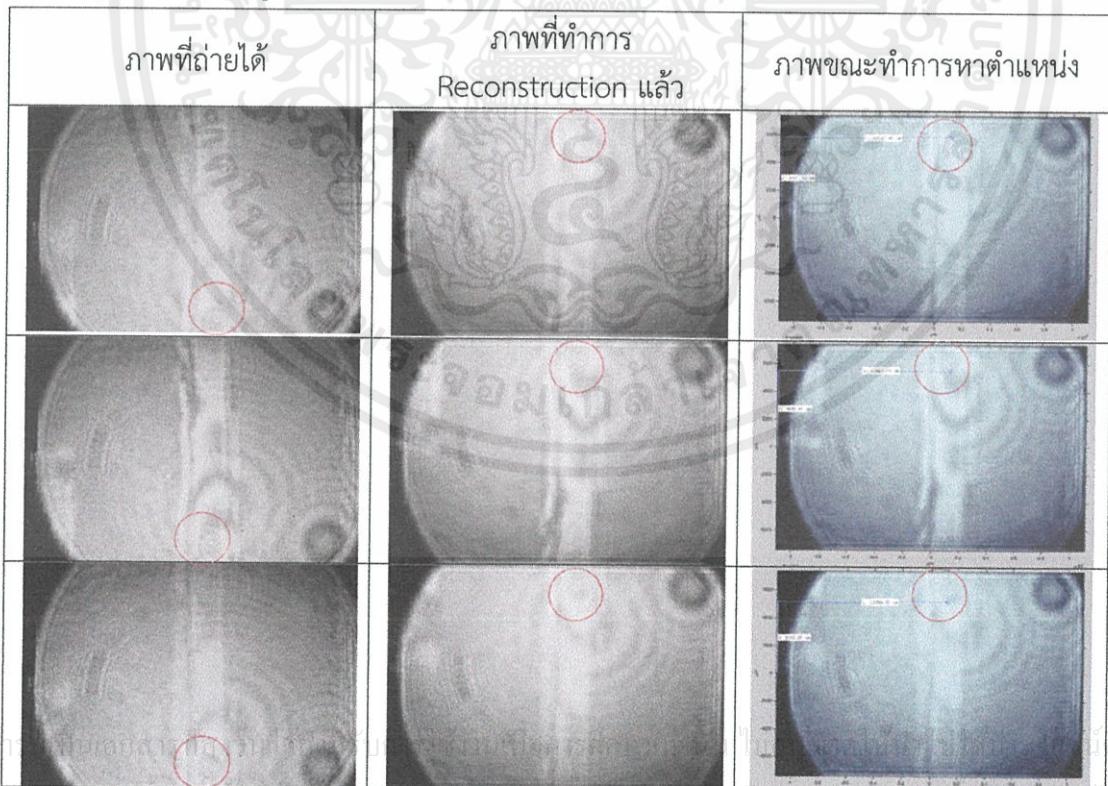
ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		
		

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ไม่ว่ากรรมใดๆทางสน อักทงห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



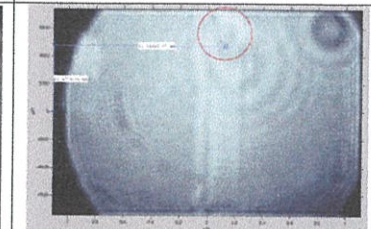

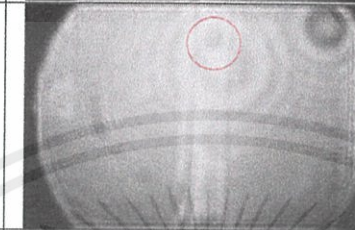
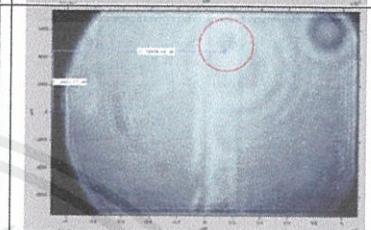
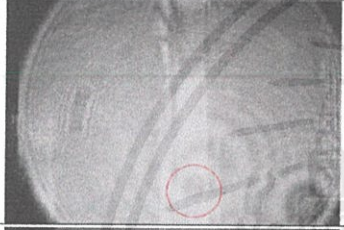
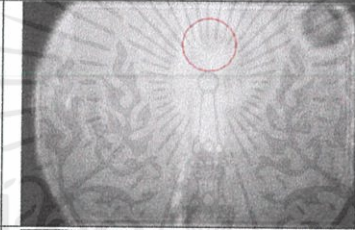








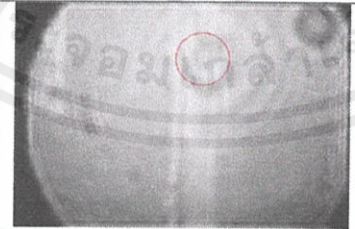
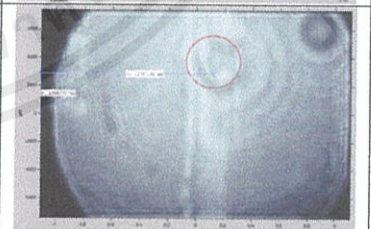

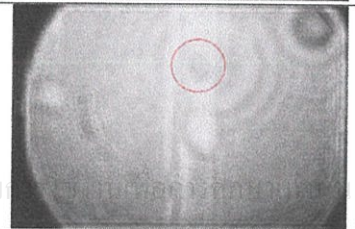
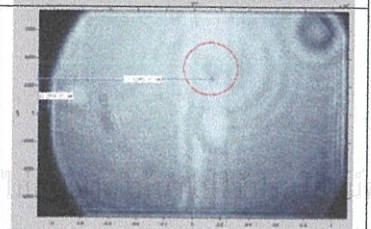


4.9.2 ผลการถ่ายภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 4.502 mol/L ในที่อุณหภูมิ 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 4.18 ภาพเม็ดพลาสติกผ่านน้ำเกลือความเข้มข้น 4.502 mol/L ในที่อุณหภูมิ 2.5×2.0 mm. ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง


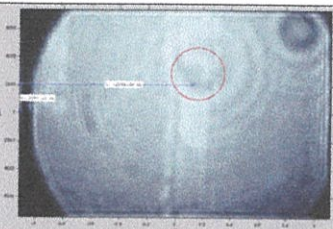

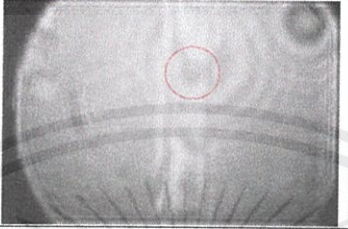


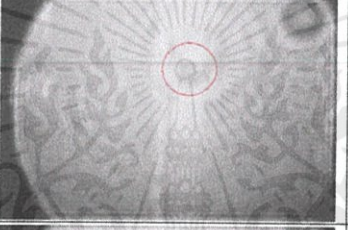









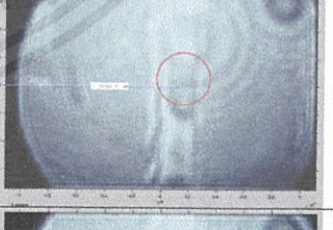





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น นอกเหนือจากนี้ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายบริการลูกค้า


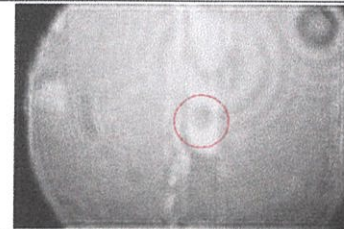
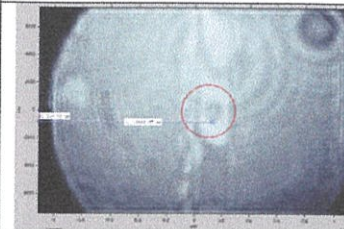
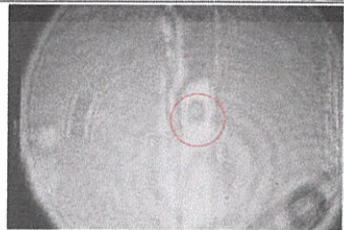

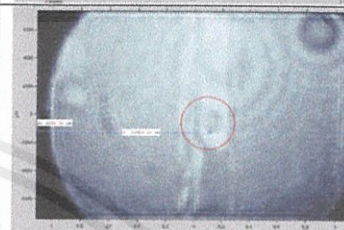
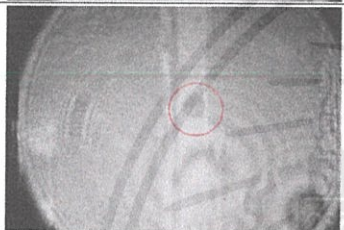
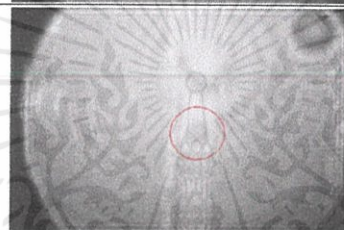













ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		
		

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทฯ / ไม่สามารถเผยแพร่หรือใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากบริษัทฯ / มีด้านการค้า



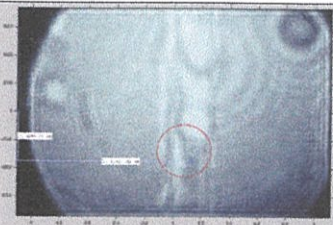

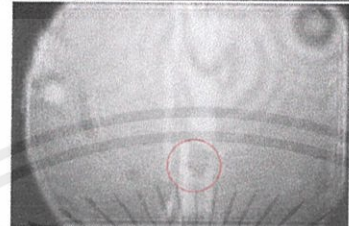
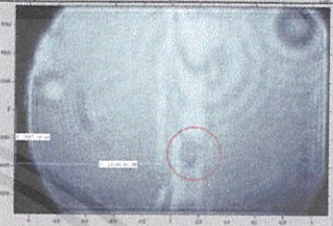
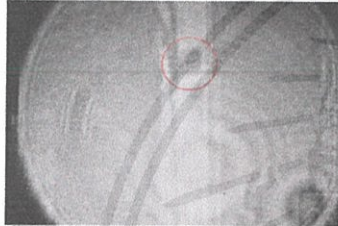
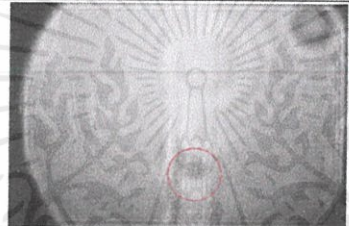





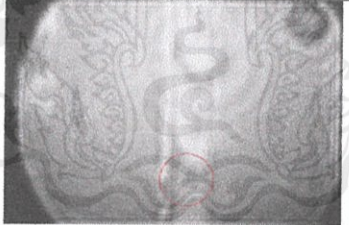



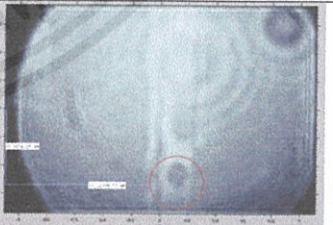

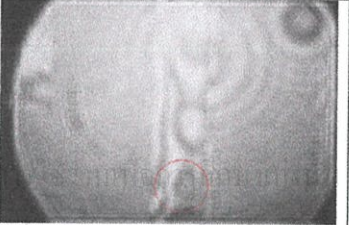
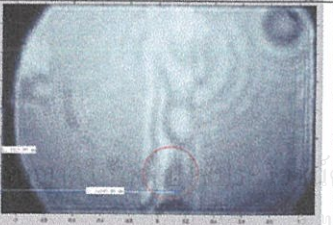
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ออกกฎหมาย โหดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		
		





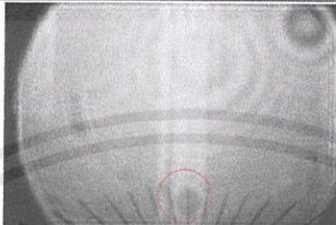
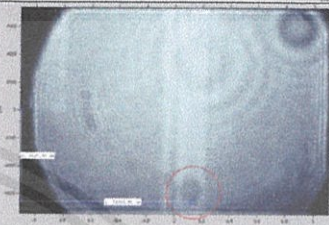

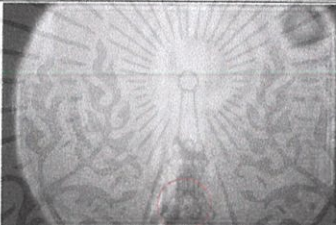

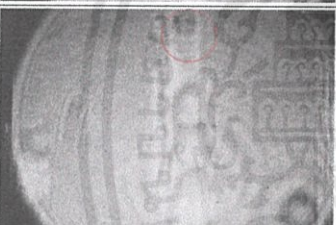


เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น นอกเหนือจากนี้ หากมีเหตุขัดแย้งและต้องฟ้องร้องคดีของเอกสารนี้ทุกกรณีก็มีการดำเนินไปใช้

ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		
		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาและวิจัยเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า  
ไม่ว่าในรูปแบบใดๆ ทั้งสิ้น ถือว่าผิดกฎหมายและต้องรับผิดชอบต่อเอกสารนี้ที่เผยแพร่สู่สาธารณะ

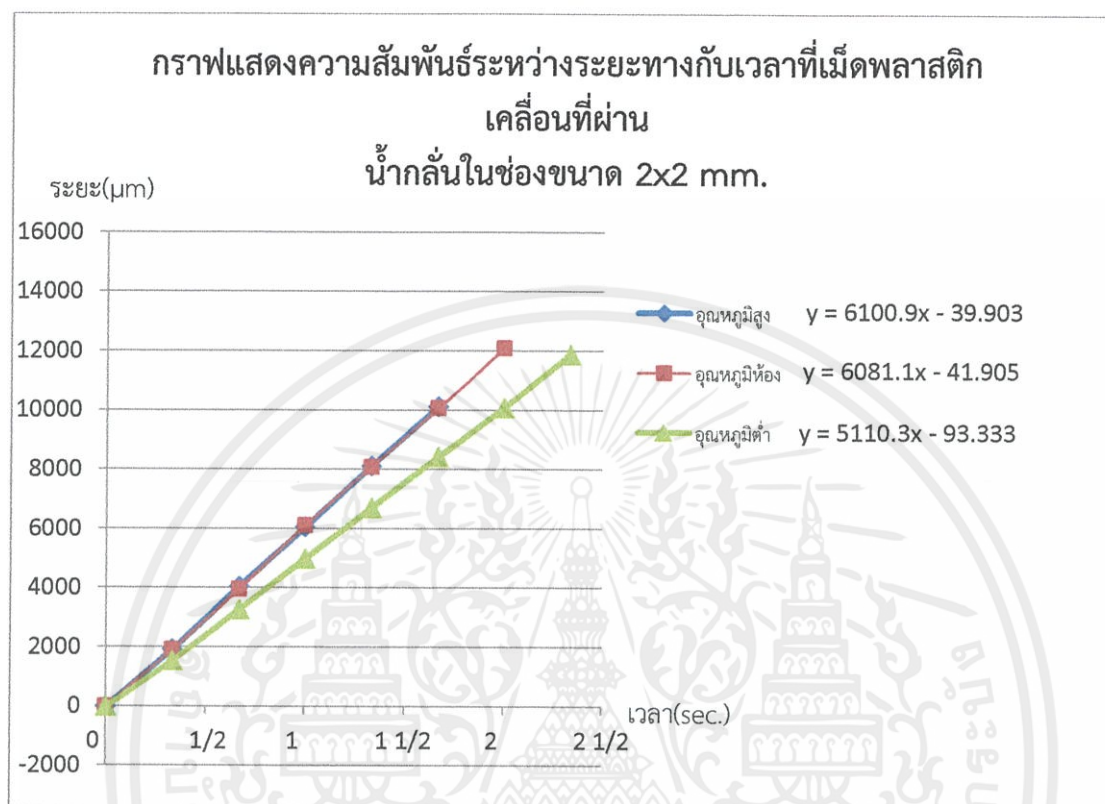
ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		
		
		
		

เอกสารนี้เป็นเอกสารราชการ ไม่ควรเผยแพร่สู่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางราชการ การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น นอกเหนือจากที่พิมพ์เผยแพร่แล้ว ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อเอกสารราชการที่พิมพ์เผยแพร่ไปใช้

ภาพที่ถ่ายได้	ภาพที่ทำการ Reconstruction แล้ว	ภาพขณะทำการหาตำแหน่ง
		
		
		
		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.10 เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำกลั่นในช่องขนาด 2x2 mm.

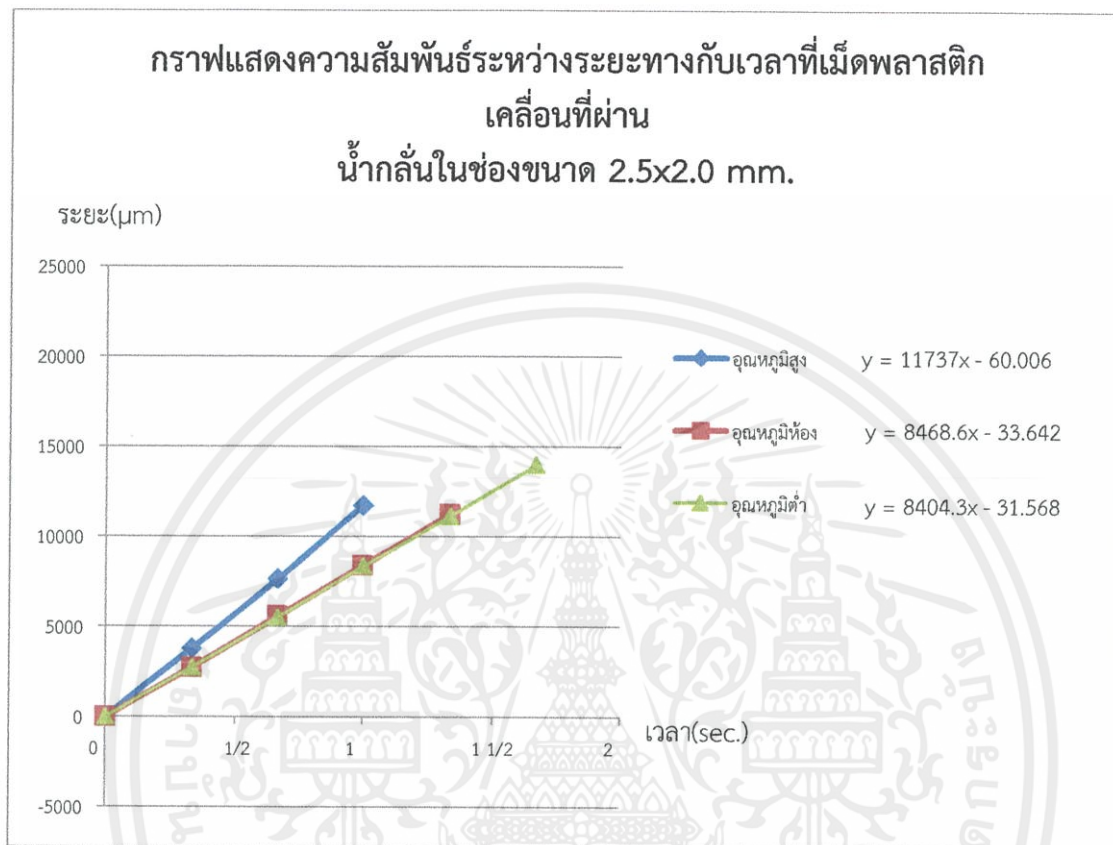


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาที่เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำกลั่นในช่องขนาด 2x2 mm.

น้ำกลั่นอุณหภูมิสูง	เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $6100.9 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
น้ำกลั่นอุณหภูมิต่ำ	เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $6081.1 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
น้ำกลั่นอุณหภูมิต่ำ	เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $5110.3 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.11 เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำกลั่นในช่องขนาด 2.5x2.0 mm.

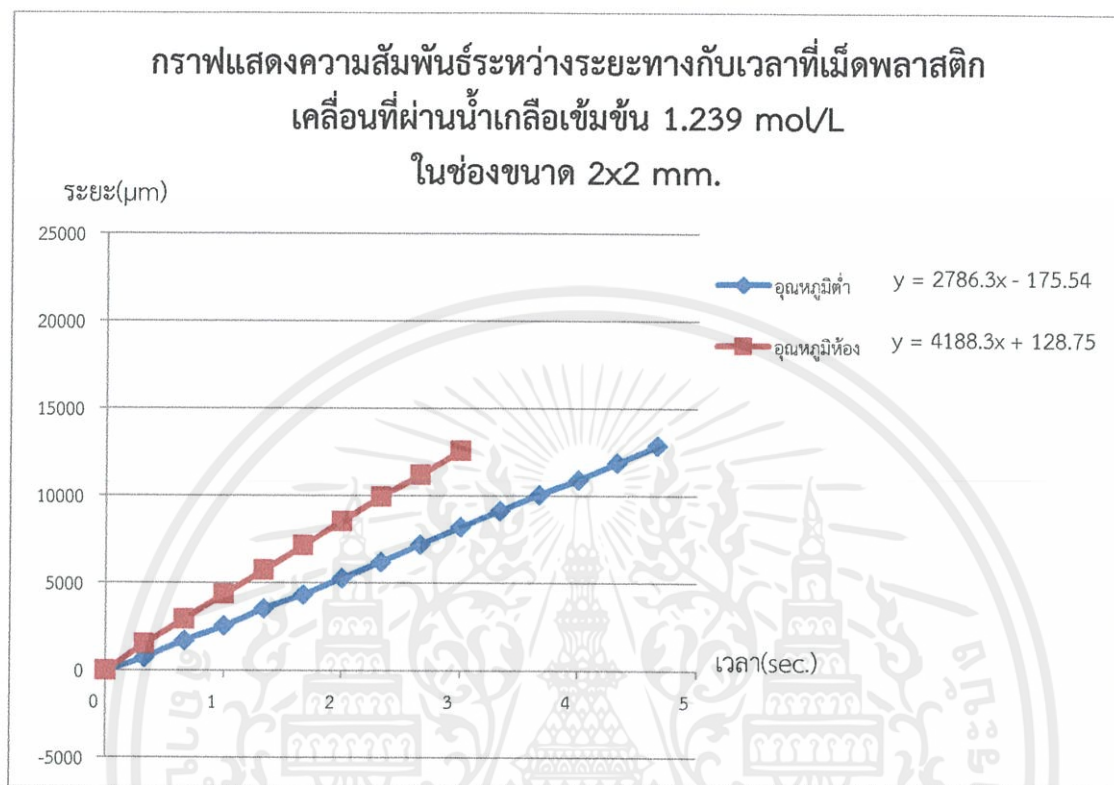


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาที่เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำกลั่นในช่องขนาด 2.5x2.0 mm.

น้ำกลั่นอุณหภูมิสูง	เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $11737 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
น้ำกลั่นอุณหภูมิห้อง	เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $8468.6 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
น้ำกลั่นอุณหภูมิต่ำ	เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $8404.3 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.12 เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 1.239 mol/L ในช่องขนาด 2x2 mm.



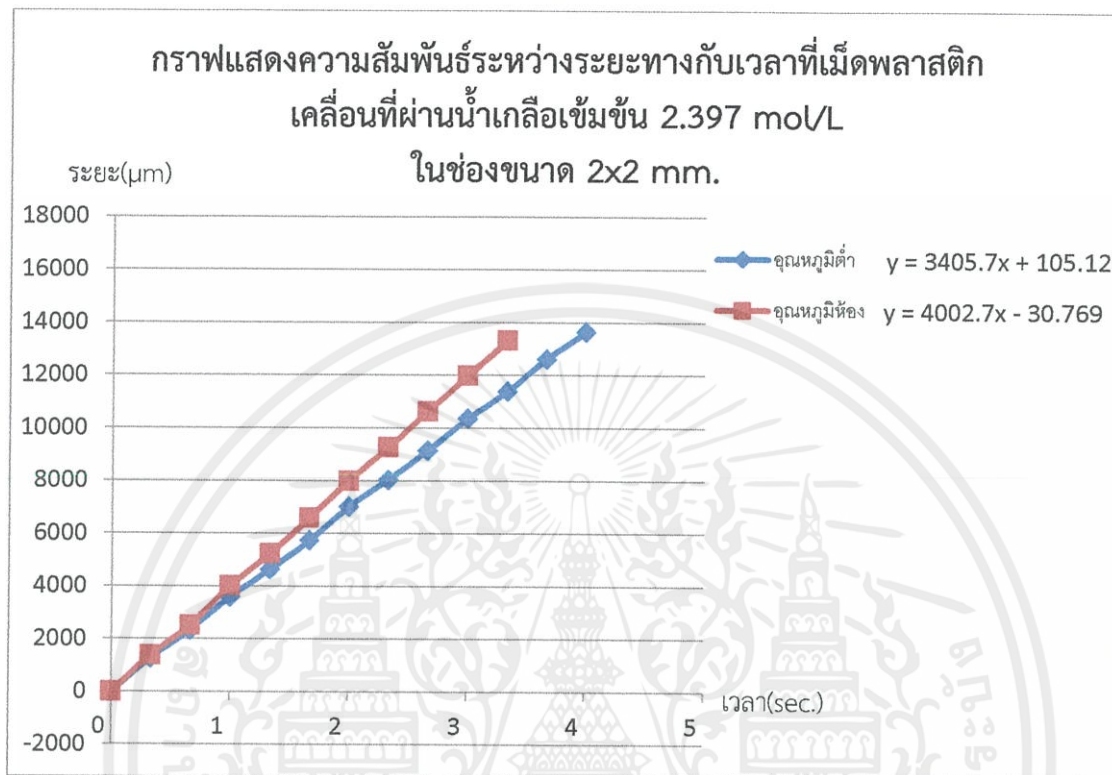
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาที่เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 1.239 mol/L ในช่องขนาด 2x2 mm.

น้ำเกลือเข้มข้น 1.239 mol/L อุณทภูมิห้อง เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $4188.3 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

น้ำเกลือเข้มข้น 1.239 mol/L อุณทภูมิต่ำ เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $2786.3 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.13 เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 2.397 mol/L ในช่องขนาด 2x2 mm.



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาที่เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 2.397 mol/L ในช่องขนาด 2x2 mm.

น้ำเกลือเข้มข้น 2.397 mol/L อุณหภูมิห้อง เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว

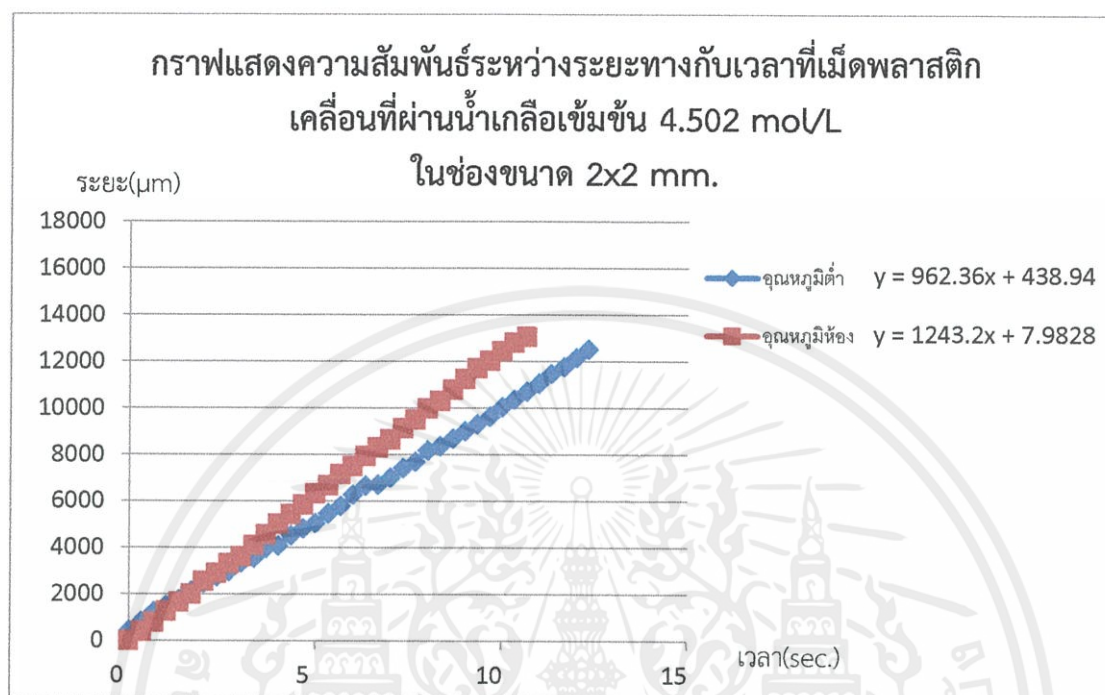
$4002.7 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

น้ำเกลือเข้มข้น 2.397 mol/L อุณหภูมิต่ำ เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว

$3405.7 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.14 เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 4.502 mol/L ในช่องขนาด 2x2 mm.



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาที่เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 4.502 mol/L ในช่องขนาด 2x2 mm.

น้ำเกลือเข้มข้น 4.502 mol/L อุณหภูมิห้อง เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว

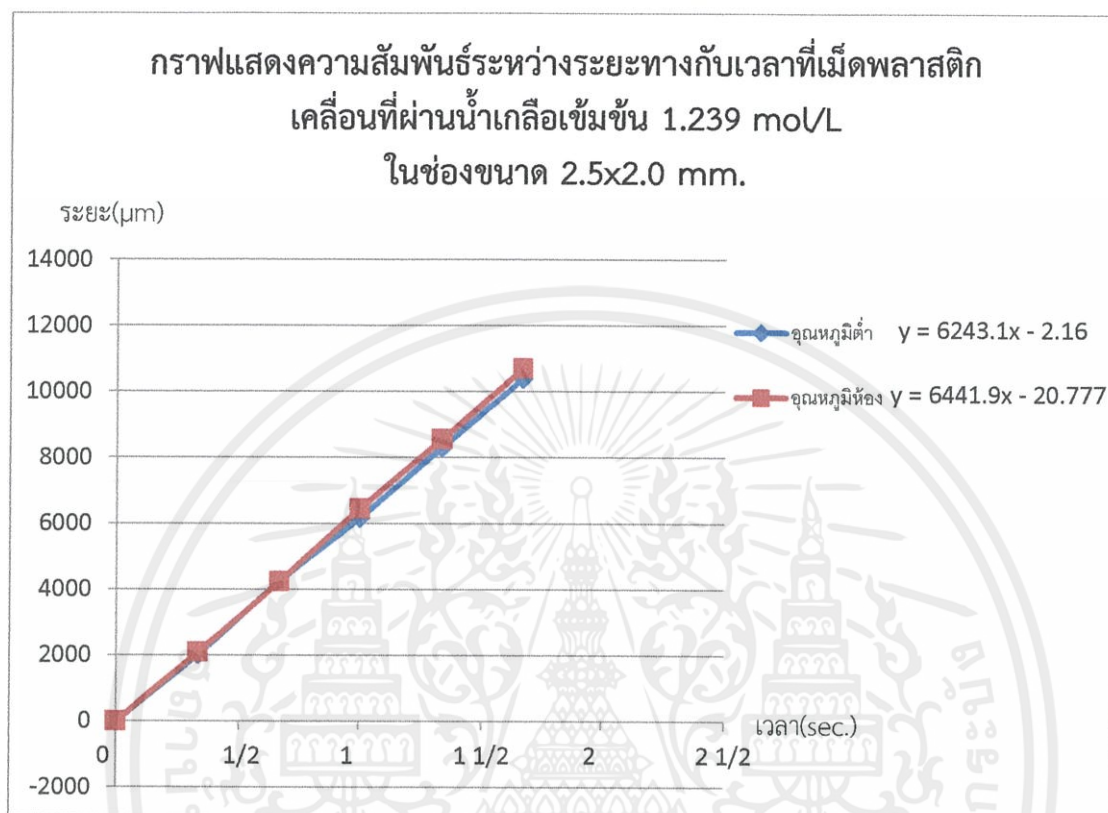
$1243.2 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

น้ำเกลือเข้มข้น 4.502 mol/L อุณหภูมิต่ำ เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว

$962.36 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.15 เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 1.239 mol/L ในช่องขนาด 2.5x2.0 mm.



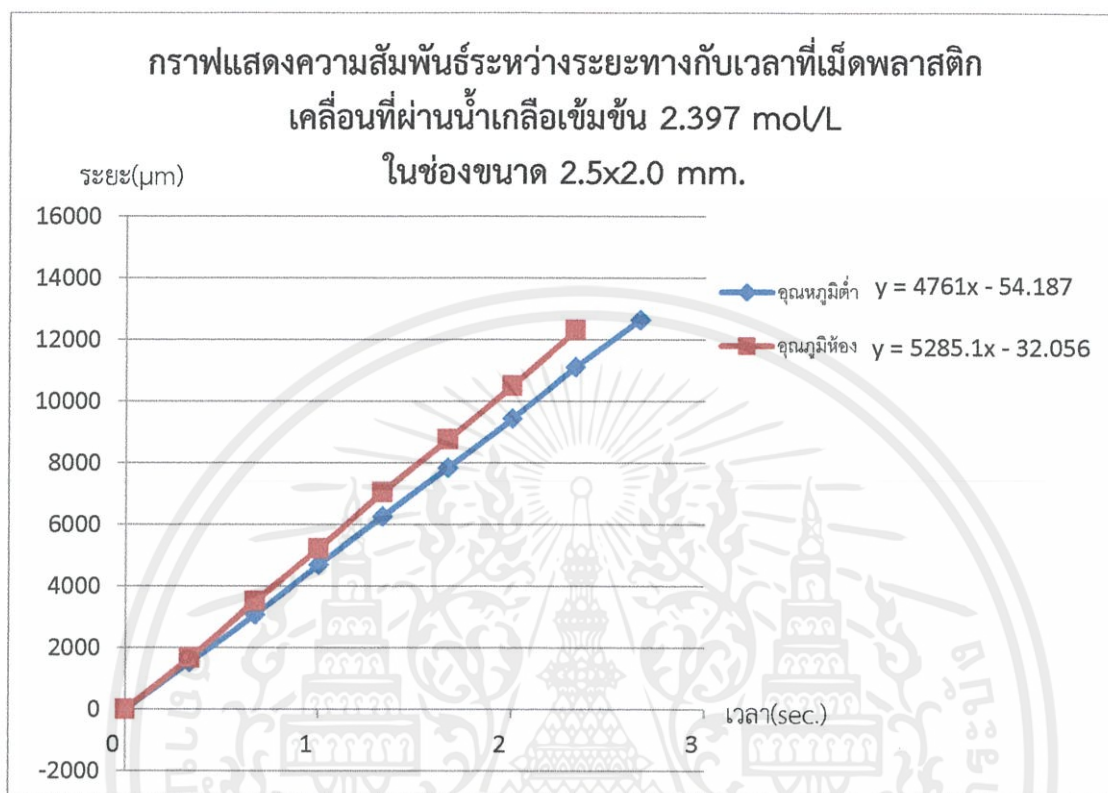
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาที่เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 1.239 mol/L ในช่องขนาด 2.5x2.0 mm.

น้ำเกลือเข้มข้น 1.239 mol/L จุดหนุมิห้อง      เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  
6441.9  $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

น้ำเกลือเข้มข้น 1.239 mol/L จุดหนุมิต่ำ      เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  
6243.1  $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.16 เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 2.397 mol/L ในช่องขนาด 2.5x2.0 mm.



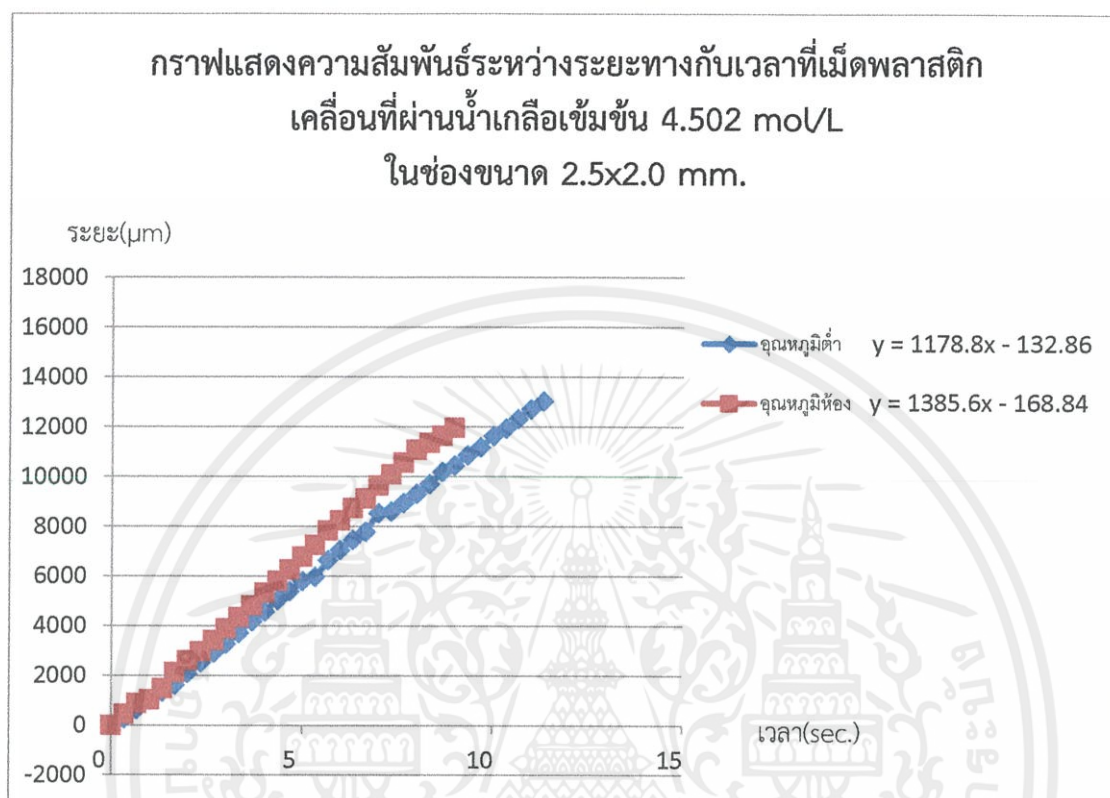
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาที่เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 2.397 mol/L ในช่องขนาด 2.5x2.0 mm.

น้ำเกลือเข้มข้น 2.397 mol/L อุณหภูมิห้อง เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  
 $5285.1 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

น้ำเกลือเข้มข้น 2.397 mol/L อุณหภูมิต่ำ เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  
 $4761 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.17 เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 4.502 mol/L ในช่องขนาด 2.5x2.0 mm.



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาที่เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านน้ำเกลือเข้มข้น 4.502 mol/L ในช่องขนาด 2.5x2.0 mm.

น้ำเกลือเข้มข้น 4.502 mol/L อนุหภูมิห้อง	เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว
$1385.6 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	
น้ำเกลือเข้มข้น 4.502 mol/L อนุหภูมิต่ำ	เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว
$1178.8 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.18 ความเร็วของเม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านของเหลว ดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 ความเร็วที่ได้จากการทดลอง

ความเร็ว( $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) ของเหลว	ช่องของไหลขนาด 2x2 mm			ช่องของไหลขนาด 2.5x2.0 mm		
	T <sub>ห้อง</sub>	< T <sub>ห้อง</sub>	> T <sub>ห้อง</sub>	T <sub>ห้อง</sub>	< T <sub>ห้อง</sub>	> T <sub>ห้อง</sub>
น้ำกลั่น	6081.1	5110.3	6100.9	8468.6	8404.3	11737
น้ำเกลือ 1.239 mol/L	4188.3	2786.3		6441.9	6243.1	
น้ำเกลือ 2.397 mol/L	4002.7	3405.7		5285.1	4761	
น้ำเกลือ 4.502 mol/L	1243.2	962.36		1385.6	1178.8	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาเกี่ยวข้องกับระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับกับเคลื่อนที่ โดยมีการติดตั้งระบบแบบ Mach Zehnder ซึ่งเป็นระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีที่มีลำแสง 2 ลำ ลำแรกทะลุผ่านตัวอย่างที่นำมาทดลอง อีกลำแทรกสอดกับลำแรกด้านหลังตัวอย่างที่นำมาทดลอง ผลการวิจัยโดยใช้ระบบนี้ได้ผลการทดลองเป็นอย่างดี ภาพที่ได้มีมิติมากกว่าการใช้ระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีที่ใช้แสงลำเดียว

การเคลื่อนที่ของเม็ดพลาสติกผ่านของเหลวในสภาวะต่างได้ ได้ผลการทดลองที่เหมือนกันคือ ความเร็วของเม็ดพลาสติกมีความเร็วที่ค่อนข้างคงที่ แต่ก็มีบางอย่างที่แตกต่างกัน ดังนี้

- ช่องสำหรับการเคลื่อนที่มีผลต่อความเร็วการเคลื่อนที่ของเม็ดพลาสติก โดยที่ช่องที่มีพื้นที่หน้าตัดมากกว่าจะทำให้เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขึ้น
- อุณหภูมิของของเหลวมีผลต่อความเร็วการเคลื่อนที่ของเม็ดพลาสติก โดยที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงขึ้น
- ความเข้มข้นหรือความหนาแน่นของของเหลวมีผลต่อความเร็วการเคลื่อนที่ของเม็ดพลาสติก โดยที่ความเข้มข้นหรือความหนาแน่นของของเหลวที่มีค่าสูงจะทำให้เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ได้ช้าลง

งานวิจัยนี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของการประยุกต์ใช้ระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีเท่านั้น อาจนำความรู้จากงานวิจัยนี้ไปใช้เป็นพื้นฐานต่อยอดได้ต่อไปในอนาคต

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

- การติดตั้งระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีจำเป็นต้องติดตั้งด้วยความระมัดระวังและวัดระยะให้แม่นยำที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อการง่ายต่อการทำให้แสงทั้งสองแทรกสอดกัน
- ภาพที่ได้หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการทั้งหมดอาจจะเห็นได้ไม่ชัดเจน แต่ขณะที่ทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่การวิจัยจะเห็นได้ว่าจะเห็นภาพที่ชัดเจน เนื่องจากเป็นภาพที่ได้จากการทำงานของงานการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อัลกอริทึมโดยตรง และสามารถชมภาพจนเห็นขอบเขตของวัตถุได้ชัดเจนที่มีการนำไปใช้

- งานวิจัยนี้ใช้ช่วงระยะเวลาการเคลื่อนที่ที่ค่อนข้างสั้น ถ้าหากให้ระบบที่ยาวกว่านี้ และใช้อุปกรณ์ที่ทราบค่าที่แน่นอน จะสามารถนำไปสู่การวิเคราะห์อื่นๆเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ผ่านของไหลและวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆของของไหลได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

Holography. (2014, November 16). In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved 19:09, November 14, 2014, from <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Holography&oldid=635476482>

Laser. (2014, November 10). In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved 21:49, November 19, 2014, from <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Laser&oldid=635964709>

Raymond A. Serway & John W. Jewett, Jr. 2558. *ฟิสิกส์1*. แปลโดย ประธาน บุรณศิริ และคณะ. กรุงเทพฯ: บริษัท พงษ์วรินทร์การพิมพ์ จำกัด.

ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ม.ป.ป. *ฟิสิกส์1*. พิมพ์ครั้งที่16. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ม.ป.ป. *ฟิสิกส์2*. พิมพ์ครั้งที่16. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วรารุณี เถาลัดดา. ม.ป.ป. *ออปโตอิเล็กทรอนิกส์*. กรุงเทพฯ: สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

แสง. (2014, ตุลาคม 25). *วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี*. สืบค้นเมื่อ 20:43, พฤศจิกายน18, 2014 จาก [// th.wikipedia.org/w/index.php?title=%E0%B9%81%E0%B8%AA%E0%B8%87&oldid=5662432](http://th.wikipedia.org/w/index.php?title=%E0%B9%81%E0%B8%AA%E0%B8%87&oldid=5662432)

ฮอโลกราฟี. (2014, พฤศจิกายน 8). *วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี*. สืบค้นเมื่อ 23:56, พฤศจิกายน15, 2014 จาก [// th.wikipedia.org/w/index.php?title=%E0%B8%AE%E0%B8%AD%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%9F%E0%B8%B5&oldid=5677067](http://th.wikipedia.org/w/index.php?title=%E0%B8%AE%E0%B8%AD%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%9F%E0%B8%B5&oldid=5677067)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้